



Πανεπιστήμιο Κύπρου

**Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
και Μηχανικών Περιβάλλοντος**

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΛΙΜΝΕΣ
ΠΙΣΣΟΥΡΙΟΥ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΜΕΤΡΑ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ**

ΔΙΑΤΡΙΒΗ MASTER OF SCIENCE

ΕΠΑΜΕΙΝΩΝΔΑΣ ΚΑΡΛΑΣ

Επιβλέπων καθηγητής:

Δημήτριος Λουκίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Λευκωσία, Δεκέμβριος 2021

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΛΙΜΝΕΣ
ΠΙΣΣΟΥΡΙΟΥ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΜΕΤΡΑ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ**

ΕΠΑΜΕΙΝΩΝΔΑΣ ΚΑΡΛΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΛΟΥΚΙΔΗΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος
Πανεπιστήμιο Κύπρου

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΠΑΝΟΣ ΠΑΠΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ, Καθηγητής
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος
Πανεπιστήμιο Κύπρου

ΚΥΡΙΑΚΟΣ ΚΥΡΟΥ, Geotechnical Consultant
Πρώην Διευθυντής Τμήματος Αναπτύξεως Υδάτων

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΛΟΥΚΙΔΗΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος
Πανεπιστήμιο Κύπρου

Στην φίλη μου,

Χαρά

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της μεταπτυχιακής μου διατριβής, Δημήτριο Λουκίδη, για τη συνεχή καθοδήγηση και βοήθεια που μου παρείχε, καθώς και για την άψογη συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας. Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, Πάνο Παπαναστασίου και Κυριάκο Κύρου, για το χρόνο που διέθεσαν για την αξιολόγηση της διατριβής μου. Επιπλέον, ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνονται στον Κ. Κύρου για τις πολύτιμες συμβουλές και ανατροφοδότηση που παρείχε σχετικά με τις δυνατότητες σταθεροποίησης της εξεταζόμενης κατολίσθησης.

Θερμές ευχαριστίες απευθύνονται στους λειτουργούς του Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης Κλεόπα Χατζηχαραλάμπους και Νίκη Κουλέρμου για τη διάθεση στον Δ. Λουκίδη στοιχείων και δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και την αδερφή μου για την υποστήριξη τους σε κάθε μου επιλογή κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά το κατολισθητικό φαινόμενο που άρχισε να εκδηλώνεται τον χειμώνα 2011/2012 στη θέση Λίμνες της κοινότητας Πισσουρίου και που συνεχίζει να εξελίσσεται μέχρι σήμερα, προκαλώντας εκτεταμένες ζημιές σε πλήθος κατοικιών καθώς και στο οδικό δίκτυο. Η συγκεκριμένη περιοχή χαρακτηρίζεται από ένα πρόδηλο παλαιοκατολισθητικό ανάγλυφο και κυριαρχείται από επιφανειακές εμφανίσεις της μάργας του γεωλογικού σχηματισμού Λευκωσίας.

Σε πρώτη φάση εξετάστηκε η γεωλογία και στρωματογραφία της περιοχής μελέτης μέσω ανασκόπησης της βιβλιογραφίας, γεωλογικών και τοπογραφικών χαρτών και επιτόπου επισκέψεων, καταγράφηκαν τα γεωϊλικά που συναντώνται (μάργα, ασβεστορροδίτης, γύψος) και σχεδιάστηκε η γεωλογική τομή για τις αναλύσεις ευστάθειας πρανούς. Ακολούθως, έγιναν προκαταρκτικές εκτιμήσεις των παραμέτρων αντοχής (συνοχή και γωνία τριβής) βάσει φυσικών χαρακτηριστικών και διαθέσιμων δεδομένων από τη βιβλιογραφία, και υπολογίστηκαν οι ανηγμένες ισοδύναμες πιέσεις που ασκούν στο έδαφος οι κτιριακές κατασκευές. Σε ότι αφορά τη στάθμη του υπόγειου νερού στην κατολισθαίνουσα περιοχή, αυτή εντοπίζεται σε βάθη 5m -15m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, σύμφωνα με γεωτρήσεις του Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης.

Ακολούθησε η μοντελοποίηση της κατολίστεσης στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 2D, όπου πραγματοποιήθηκαν σειρές προσομοιώσεων εξετάζοντας πιθανά σενάρια σχετικά με τις παραμέτρους του προβλήματος και της πιθανής γεωμετρίας του μηχανισμού ολίσθησης. Οι αναλύσεις καταδεικνύουν ότι οι μετακινήσεις του εδάφους που παρατηρούνται σήμερα στο πρανές οφείλονται στην πλήρη επανενεργοποίηση μιας παλαιοκατολίστεσης, με την επιφάνεια ολίσθησης να είναι εντός της πλαστικής μάργας του σχηματισμού Λευκωσίας και σε βάθος 40m-47m από την επιφάνεια του εδάφους. Σύμφωνα με τις αναλύσεις, την επανενεργοποίηση της παλαιοκατολίστεσης προκάλεσε η άνοδος της στάθμης του φρεάτιου ορίζοντα από την αστική χρήση γης (λύματα, αρδεύσεις) εν τη απουσία αποχετευτικού συστήματος.

Έχοντας αποκρυσταλλώσει τα χαρακτηριστικά του κατολισθητικού μηχανισμού και τις παραμέτρους αντοχής της μάργας επί της επιφάνειας ολίσθησης, εκτελέστηκαν στη συνέχεια αναλύσεις για την εύρεση λύσεων που θα μπορούσαν να σταθεροποιήσουν την κατολίστεση και να επαναφέρουν την ασφάλεια στην περιοχή με επιθυμητό συντελεστή ασφαλείας ίσο με 1.25. Εξετάστηκαν και διαστασιολογήθηκαν τρεις δέσμες

σταθεροποιητικών μέτρων: 1) σταθεροποίηση αποκλειστικά με την κατασκευή ενός επιχώματος μεγάλης έκτασης, 2) κατασκευή ενός μικρότερου επιχώματος και ταυτόχρονη ταπείνωση του φρεάτιου ορίζοντα με αντλήσεις, 3) σταθεροποίηση αποκλειστικά μέσω της ταπείνωσης του φρεάτιου ορίζοντα. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων, προκύπτει ότι οικονομικότερη λύση είναι η ελάττωση της στάθμης του φρεάτιου ορίζοντα κατά 9m, της οποίας όμως η εφαρμογή στην πράξη ενέχει μεγαλύτερες αβεβαιότητες σε σύγκριση με τη ακριβότερη λύση του σταθεροποιητικού επιχώματος.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. Εισαγωγικές έννοιες κατολισθητικών φαινομένων	1
1.1.1. Γενικά στοιχεία.....	1
1.1.2. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κατολισθήσεων	2
1.1.3. Ταξινόμηση κατολισθήσεων	6
1.1.4. Ενεργότητα κατολίσθησης.....	12
1.1.5. Αίτια των κατολισθήσεων.....	15
1.1.6. Μέτρα αντιμετώπισης	16
1.2. Αντικείμενο της παρούσας ερευνητικής εργασίας	18
1.3. Διάρθρωση της παρούσας ερευνητικής εργασίας	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	23
2.1. Δημογραφικά στοιχεία	23
2.2. Κλιματολογικά στοιχεία.....	24
2.3. Υδρογεωλογικά στοιχεία.....	27
2.4. Γεωλογικά στοιχεία	30
2.5. Στοιχεία σεισμικότητας.....	35
2.6. Αναγνώριση γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών	37
2.7. Δορυφορικές μετρήσεις μετακινήσεων	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	44
3.1 Στρωματογραφικό μοντέλο περιοχής Λίμνες Πισσουρίου.....	44
3.1.1 Γεωλογικοί χάρτες περιοχής Πισσουρίου.....	44
3.1.2 Χάρτες ισοϋψών καμπύλων	48
3.1.3 Χάρτες για την μελέτη της στρωματογραφίας	49
3.1.4 Διαδικασία σχεδιασμού γεωλογικής τομής.....	50
3.2 Εκτίμηση φρεάτιου υδροφόρου ορίζοντα	61
3.3 Κατακόρυφα φορτία στην περιοχή μελέτης.....	64
3.4 Εκτίμηση παραμέτρων αντοχής των γεωυλικών της περιοχής	65
3.4.1 Δοκιμές σημειακής φόρτισης σε ασβεστορρουδίτη και γύψο.....	66
3.4.2 Βραχώμαζα ασβεστορρουδίτη	67
3.4.3 Βραχώμαζα γύψου.....	72
3.4.4 Μάργα σχηματισμού Λευκωσίας.....	76
3.5 Μοντελοποίηση στο πρόγραμμα Plaxis 2D.....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ.....	94
4.1 Επίδραση της τιμής παραμένουσας συνοχής.....	95
4.2 Βάθος επιφάνειας ολίσθησης και υδροφόρου ορίζοντα.....	96
4.3 Καθορισμός θέσης πόδα κατολίσθησης.....	103

4.4 Αίτια επανενεργοποίησης της παλαιοκατολίσθησης.....	109
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΤΡΑ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	111
5.1 Σταθεροποίηση αποκλειστικά με επίχωμα ποδός.....	111
5.1.1 Σχεδίαση επιχώματος	113
5.1.2 Ογκομέτρηση επιχώματος	116
5.2 Σταθεροποίηση με συνδυασμό επιχώματος ποδός και ταπείνωσης φρεάτιου ορίζοντα	118
5.2.1 Σχεδίαση επιχώματος	119
5.2.2 Ογκομέτρηση επιχώματος	121
5.2.3 Απαιτούμενος αριθμός αντλητικών γεωτρήσεων	122
5.2.4 Καθιζήσεις λόγω αντλήσεων	127
5.3 Σταθεροποίηση αποκλειστικά με ταπείνωση φρεάτιου ορίζοντα	130
5.3.1 Απαιτούμενος αριθμός αντλητικών γεωτρήσεων	131
5.3.2 Καθιζήσεις λόγω αντλήσεων	134
5.4 Κοστολόγηση μέτρων σταθεροποίησης.....	136
5.4.1 Κόστος τεχνικών έργων.....	136
5.4.2 Κόστος απαλλοτριώσεων	140
5.4.3 Συνολικό κόστος.....	143
5.5 Εκτίμηση σεισμικών μετατοπίσεων	145
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	148
6.1 Κατολισθητικό φαινόμενο.....	148
6.2 Απαιτούμενα σταθεροποιητικά μέτρα	149
6.3 Καταληκτικά σχόλια.....	152
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	153
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	158
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	162

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Εισαγωγικές έννοιες κατολισθητικών φαινομένων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κυριότερα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των κατολισθήσεων. Επίσης, αναλύονται μέθοδοι ταξινόμησης των κατολισθήσεων και γίνεται αναφορά στους παράγοντες που προκαλούν κατολισθητικά φαινόμενα, αλλά και στα μέτρα που λαμβάνονται με σκοπό την αντιμετώπιση τους.

1.1.1. Γενικά στοιχεία

Κατολισθητικά φαινόμενα παρατηρούνται σε ολόκληρο τον πλανήτη, ανεξάρτητα από τα εδαφικά χαρακτηριστικά και τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην εκάστοτε περιοχή. Εντούτοις, η έκταση και η συχνότητα τέτοιου είδους φαινομένων ποικίλει, όπως και ο βαθμός στον οποίο μπορούν να πλήξουν την οικονομία σε τοπικό, περιφερειακό ή εθνικό επίπεδο. Οι κατολισθήσεις είναι καταστροφικά φυσικά φαινόμενα (γεωκίνδυνοι) που μπορεί να προκαλέσουν απώλειες ανθρώπινων ζώων, ενώ δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις εκτοπισμού πληθυσμών. Στην Κύπρο, χαρακτηριστικές είναι οι περιπτώσεις μεταστέγασης χωριών της Επαρχίας Πάφου, όπως Στατός, Άγιος Φώτιος και Χολέτρια.

Ο Cruden (1991) αναφέρει ότι ο Terzaghi το 1950 όρισε την κατολίσθηση ως μια γρήγορη κίνηση της μάζας πετρώματος ή εδάφους ενός πρανούς, της οποίας το κέντρο βάρους μετακινείται προς τα κατόντη. Οι Zaruba & Mencl (1976) θεώρησαν ως κατολίσθηση μια γρήγορη κίνηση εδαφών ή πετρωμάτων που οφείλεται στην ολίσθηση ενός τμήματος πρανούς που διαχωρίζεται από το υπόλοιπο σταθερό τμήμα από μια καλά καθορισμένη επιφάνεια. Στις πλείστες όμως των κατολισθήσεων φυσικών πρανών στον Κυπριακό χώρο, η κίνηση του εδάφους χαρακτηρίζεται περισσότερο ως αργή παρά γρήγορη, με ρυθμό μετατοπίσεων της τάξης των λίγων εκατοστών έως λίγων μέτρων ανά έτος.

Σύμφωνα με το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, ο όρος κατολίσθηση πρανούς αναφέρεται στην αποσταθεροποίηση μάζας στρωμάτων πάνω σε μια πλαγιά και την μετακίνηση της προς τα κάτω. Η κίνηση προκαλείται από το ίδιο βάρος των στρωμάτων μόλις διαταραχθεί η ισορροπία της πλαγιάς. Το φαινόμενο μπορεί να εκδηλωθεί στιγμιαία και πολύ γρήγορα, ή να προηγηθεί μια αργή και εξελικτική κίνηση (Ευθυμίου και Χατζηχαλαράμπος, 2013).

Η μελέτη και αντιμετώπιση των κατολισθητικών φαινομένων, λόγω του πλήθους των παραγόντων που συντελούν στην εκδήλωσή τους, απαιτεί εξειδικευμένη γνώση, παρουσιάζει δυσκολίες και συχνά είναι ιδιαίτερα δαπανηρή. Συνεπώς κρίνεται προτιμότερη η λήψη προληπτικών μέτρων, όπου αυτό είναι δυνατό, ώστε να αποτρέπεται η πρόκληση τέτοιου είδους φαινομένων λόγω ανθρώπινων δραστηριοτήτων ή να αποφεύγεται η ανάπτυξη γης και κατασκευή υποδομών σε περιοχές που έχουν υψηλή επιδεκτικότητα σε κατολισθήσεις.

1.1.2. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κατολισθήσεων

Η Διεθνής Ένωση Τεχνικής Γεωλογίας (IAEG,1990) δημιούργησε μια λίστα η οποία περιγράφει με λεπτομέρεια τους κυριότερους όρους που χαρακτηρίζουν τη μορφολογία μιας κατολίσθησης (Πίνακας 1.1). Η ονοματολογία αφορά όρους στην Αγγλική και στην Γαλλική γλώσσα, οι οποίοι ακολούθως μεταφράστηκαν σε άλλες γλώσσες, διευκολύνοντας έτσι την επικοινωνία μεταξύ των επιστημόνων διεθνώς. Η χρήση των συγκεκριμένων όρων συντελεί στην ακριβή περιγραφή μιας κατολίσθησης και βοηθά στη διαπίστωση της έκτασής της, κάτι το οποίο είναι καθοριστικό για τον υπολογισμό του όγκου της και κατ' επέκταση την επιλογή των κατάλληλων μέτρων αντιμετώπισης του φαινομένου.

Πίνακας 1.1. Όροι που περιγράφουν τη γεωμορφολογία των κατολισθήσεων σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Τεχνικής Γεωλογίας. Πηγή: (IAEG,1990).

A/A	Ονομασία	Ορισμός
1	Στέψη (Crown)	Το υψηλότερο πρακτικά σταθερό τμήμα του φυσικού εδάφους το οποίο είναι πλησιέστερα στην κατακρήμνιση.
2	Κύρια κατακρήμνιση (Main scarp)	Απότομο βύθισμα της επιφάνειας του φυσικού εδάφους στο ανώτερο τμήμα της κατολίσθησης το οποίο προκλήθηκε από την κίνηση της ολισθαίνουσας μάζας.
3	Κορυφή (Top)	Το υψηλότερο σημείο επαφής μεταξύ της ολισθαίνουσας μάζας (13) και της κύριας κατακρήμνισης (2).

Πίνακας 1.1 (συνέχεια)

4	Κεφαλή (Head)	Τα ανώτερα τμήματα της κατολίσθησης κατά μήκος της επαφής της ολισθαίνουσας μάζας και της κύριας κατακρήμισης (2).
5	Δευτερεύουσα κατακρήμιση (Minor or secondary scarp)	Μικρότερη κατακρήμιση στο σώμα της ολισθαίνουσας μάζας που έχει προκύψει από διαφορικές κινήσεις αυτής.
6	Κύριο σώμα (Main body)	Το τμήμα της ολισθαίνουσας μάζας το οποίο υπέρκειται της επιφάνειας ολίσθησης, μεταξύ της κύριας κατακρήμισης (2) και της απόληξης της επιφάνειας ολίσθησης (11).
7	Πόδας (Foot)	Το τμήμα της κατολίσθησης που έχει μετακινηθεί πέραν της απόληξης της επιφάνειας ολίσθησης (11) και υπέρκειται της επιφάνειας του φυσικού εδάφους.
8	Άκρο (Tip)	Το σημείο του πόδα (7) που απέχει τη μεγαλύτερη απόσταση από την κορυφή (3) της κατολίσθησης.
9	Απολήξεις πόδα (Toe)	Το κατώτατο, συνήθως κυρτό, όριο της ολισθαίνουσας μάζας της κατολίσθησης.
10	Επιφάνεια ολίσθησης (Slip surface)	Η επέκταση της επιφάνειας της κύριας κατακρήμισης (2) κάτω από την ολισθαίνουσα μάζα μιας κατολίσθησης.
11	Απόληξη της επιφάνειας ολίσθησης (Toe of slip surface)	Η τομή μεταξύ του κατωτέρου τμήματος της επιφάνειας ολίσθησης (10) και της επιφάνειας του φυσικού εδάφους.
12	Επιφάνεια διαχωρισμού (Surface of separation)	Τμήμα της αρχικής επιφάνειας του φυσικού εδάφους που καλύπτεται από τον πόδα (7) της κατολίσθησης.
13	Ολισθαίνουσα μάζα (Displaced material)	Υλικό μετατοπισμένο από την αρχική του θέση στο πρηνές λόγω της κατολίσθησης.
14	Ζώνη απομείωσης (Zone of depletion)	Περιοχή της κατολίσθησης στην οποία η ολισθαίνουσα μάζα (13) βρίσκεται κάτω από την αρχική επιφάνεια του φυσικού εδάφους.
15	Ζώνη συσσώρευσης (Zone of accumulation)	Περιοχή της κατολίσθησης στην οποία η ολισθαίνουσα μάζα βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια του φυσικού εδάφους.
16	Απομείωση (Depletion)	Ο όγκος που περιορίζεται από την κύρια κατακρήμιση (2), την απομειωμένη μάζα (17)

Πίνακας 1.1 (συνέχεια)

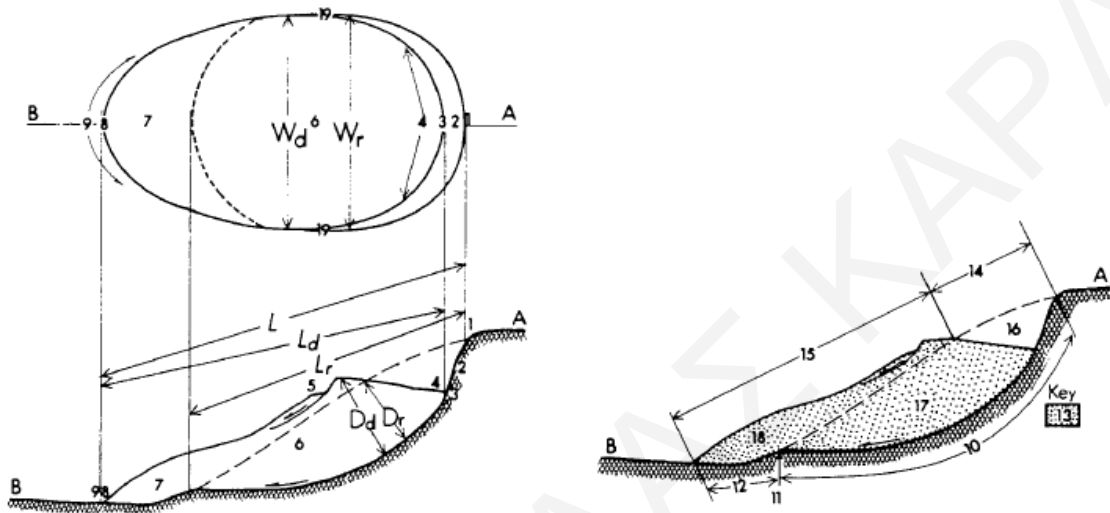
		και την αρχική επιφάνεια του φυσικού εδάφους.
17	Απομειωμένη μάζα (Depleted mass)	Τμήμα της ολισθαίνουσας μάζας (13) η οποία είναι κάτω από την αρχική επιφάνεια του φυσικού εδάφους.
18	Συσσώρευση ή Διόγκωση (Accumulation)	Ο όγκος της ολισθαίνουσας μάζας (13), ο οποίος βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια του φυσικού εδάφους.
19	Πλευρά (Flank)	Η δεξιά ή αριστερή πλευρά της κατολίσθησης, όπως αυτές φαίνονται από την στέψη και κοιτώντας προς τα κατόντη.

Επιπλέον, οι απαιτούμενες για τον καθορισμό μιας κατολίσθησης διαστάσεις περιγράφονται στον Πίνακα 1.2.

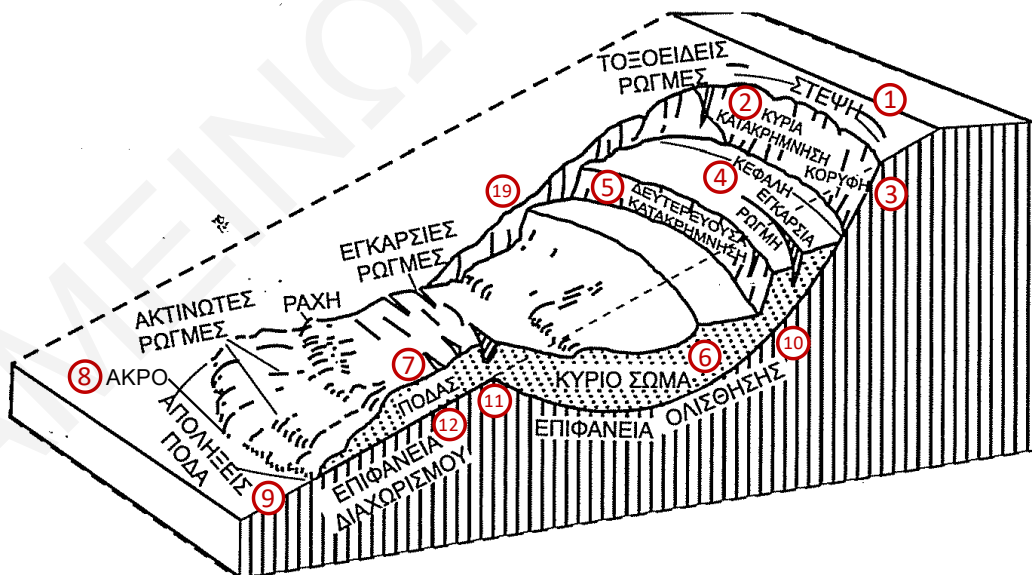
Πίνακας 1.2. Διαστάσεις κατολίσθησης. Πηγή: (IAEG,1990).

A/A	Ονομασία	Ορισμός
1	Μήκος της επιφάνειας ολίσθησης (L_r)	Η απόσταση από την απόληξη της επιφάνειας ολίσθησης έως την στέψη.
2	Μήκος ολισθαίνουσας μάζας (L_d)	Η απόσταση από το κατόντη άκρο της ολισθαίνουσας μάζας μέχρι την κορυφή της.
3	Συνολικό μήκος (L)	Η απόσταση από το κατόντη άκρο μέχρι τη στέψη της κατολίσθησης.
4	Πλάτος επιφάνειας ολίσθησης (W_r)	Η μέγιστη απόσταση μεταξύ των πλευρικών ορίων της επιφάνειας ολίσθησης, κάθετα στο μήκος της (L_r).
5	Πλάτος ολισθαίνουσας μάζας (W_d)	Η μέγιστη απόσταση μεταξύ των πλευρικών ορίων της ολισθαίνουσας μάζας, κάθετα στο μήκος της (L_d).
6	Βάθος της επιφάνειας ολίσθησης (D_r)	Η μέγιστη απόσταση της επιφάνειας ολίσθησης από την αρχική επιφάνεια του εδάφους, μετρημένη κάθετα στο επίπεδο της αρχικής επιφάνειας του εδάφους.
7	Βάθος της ολισθαίνουσας μάζας (D_d)	Η μέγιστη απόσταση της επιφάνειας ολίσθησης από την τρέχουσα επιφάνεια του εδάφους, μετρημένη κάθετα στο επίπεδο της τρέχουσας επιφάνειας του εδάφους.

Οι όροι που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των τμημάτων μιας κατολίσθησης αλλά και οι διαστάσεις της, που παρατέθηκαν στους ανωτέρω πίνακες, παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 1.1α. Οι κυριότεροι όροι του Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται επίσης στο Σχήμα 1.1β σε τρισδιάστατη απεικόνιση. Ο αύξων αριθμός του κάθε όρου αντιστοιχεί στον ίδιο αριθμό στα σχήματα.



(α)



(β)

Σχήμα 1.1. Τυπική μορφολογία μιας περιστροφικής κατολίσθησης με γραφική επεξήγηση των όρων : α) επίπεδη απεικόνιση (κάτοψη και τομή) (IAEG, 1990), β) τρισδιάστατη απεικόνιση (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002).

Πέρα από τα προαναφερθέντα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, στην ελεύθερη επιφάνεια της ολισθαίνουσας μάζας παρατηρούνται ρωγμές που ποικίλουν σε έκταση, εύρος (άνοιγμα), αλλά και προσανατολισμό (Σχήμα 1.1β). Οι ρωγμές κοντά στην κεφαλή της κατολίσθησης είναι εγκάρσιες, δηλαδή κάθετες στο L_d (το διαμήκη άξονα της κατολίσθησης) και τη διεύθυνση κίνησης, και οφείλονται στους εφελκυσμούς και στο εκτατικό παραμορφωσιακό καθεστώς που επικρατεί στο ανώτερο τμήμα της ολισθαίνουσας μάζας. Στο κατώτερο μέρος του κυρίως σώματος καθώς και στον πόδα αναμένεται η ύπαρξη διαμήκων ρωγμών (δηλ. παράλληλες στον διαμήκη άξονα της κατολίσθησης και στη διεύθυνση κίνησης). Η ανάπτυξή τους οφείλεται στο θλιπτικό καθεστώς τάσεων που επικρατεί λόγω της πίεσης που ασκούν στο έδαφος της κατολίσθησης οι μετακινήσεις των ανάντη τμημάτων της ολισθαίνουσας μάζας. Στις περιστροφικές ολισθήσεις ενδέχεται να εμφανιστούν τοπικά εγκάρσιες ρωγμές στο ανώτερο τμήμα του ποδός λόγω της εκεί κάμψης (με τα κοίλα προς τα κάτω) της ολισθαίνουσας μάζας. Εκτός από τις ρωγμές, η διαταραχή της γεωμετρίας της επιφάνειας του εδάφους λόγω των παραμορφώσεων καθώς και της ανάστροφης κλίσης που αναπτύσσει στην περιοχή της κεφαλής στην περίπτωση περιστροφικών ολισθήσεων έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν σημεία στην επιφάνεια όπου λιμνάζει παροδικά νερό της βροχής (ponding).

1.1.3. Ταξινόμηση κατολισθήσεων

Η κατάταξη των κατολισθήσεων σε κατηγορίες έχει απασχολήσει κατά καιρούς την επιστημονική κοινότητα και έχουν προταθεί διάφορα συστήματα ταξινόμησης. Για παράδειγμα, ο Erskine (1973) θεωρεί ότι η κατάταξη των κατολισθήσεων θα πρέπει να στηρίζεται στην εξέλιξη τους, ενώ θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη οι πιθανές επιπτώσεις τους. Η κατηγοριοποίηση των Zaruba & Mencl (1976) βασίζεται κυρίως στην φύση και την συνεκτικότητα του υλικού. Σύμφωνα με τον Coates (1977), οι παράμετροι που καθορίζουν την ταξινόμηση των κατολισθήσεων είναι το υλικό μετακίνησης και ο τύπος μετακίνησης. Σήμερα, το επικρατέστερο σύστημα ταξινόμησης είναι αυτό που προτάθηκε από τον Varnes (1978), όπου η κατηγοριοποίηση εξαρτάται από το είδος της κίνησης και τον τύπο του υλικού που μετακινείται.

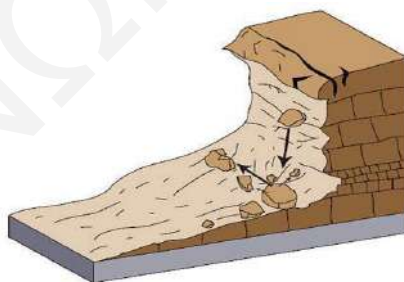
1.1.3.1 Ταξινόμηση κατολισθήσεων με βάση το είδος της κίνησης

Οι κατολισθήσεις με βάση το είδος της κίνησης τους, διακρίνονται σύμφωνα με τον Varnes (1978) σε:

- Καταπτώσεις ή βραχοπτώσεις (Rockfalls)
- Ανατροπές (Topples)
- Ολισθήσεις (Slides)
- Πλευρικές εξαπλώσεις (Lateral spreads)
- Ροές (Flows)
- Σύνθετες κινήσεις (Complex slides)
- Ερπυσμός (Creep)

Καταπτώσεις (Rockfalls)

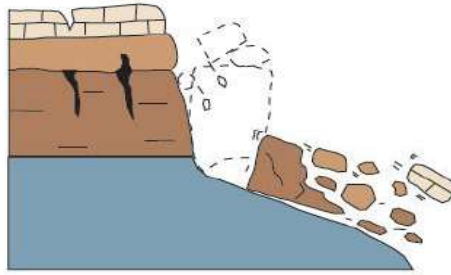
Οι καταπτώσεις αφορούν βραχώδεις σχηματισμούς και προκαλούνται όταν σχετικά μικρά τμήματα βραχομάζας (τεμάχια) αποκολλώνται από απότομα πρανή κατά μήκος μιας ασυνέχειας. Τα τμήματα βραχομάζας μετατοπίζονται ταχύτατα, εξαιτίας της βαρύτητας, με κύλιση ή αναπήδηση. Μια χαρακτηριστική μορφή κατάπτωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2. Τυπική μορφή κατάπτωσης. Πηγή: (Σταυροπούλου, 2015).

Ανατροπές (Topples)

Οι ανατροπές συμβαίνουν σε βραχώδεις σχηματισμούς και εκδηλώνονται κυρίως με περιστροφική προς τον ελεύθερο χώρο κίνηση του τεμάχους που αποκολλάται γύρω από έναν άξονα περιστροφής ο οποίος βρίσκεται σχετικά χαμηλά, κοντά στη βάση του πρανούς. Η κίνηση οφείλεται στην επίδραση της βαρύτητας και δυνάμεων που ασκούνται από παρακείμενες μάζες, ή στην πίεση του νερού που βρίσκεται στις ασυνέχειες της βραχομάζας (Σχήμα 1.3).

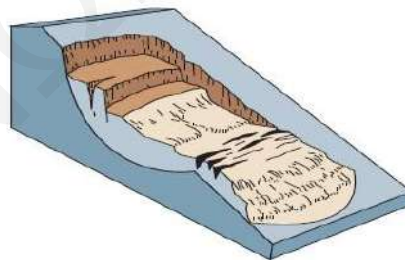


Σχήμα 1.3. Τυπική μορφή ανατροπής. Πηγή: (Σταυροπούλου, 2015).

Ολισθήσεις (Slides)

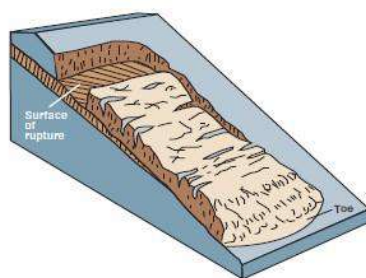
Οι ολισθήσεις συμβαίνουν κατά μήκος μιας ή περισσότερων επιφανειών (ή σχετικά λεπτών ζωνών) αστοχίας υπό την επίδραση διατμητικών τάσεων. Η κίνηση μπορεί να συμβεί άπαξ και να αφορά μια μόνο επιφάνεια ολίσθησης ή να εξελιχθεί προοδευτικά προς τα ανάντη από μία αρχική επιφάνεια ολίσθησης και ενσωματώνοντας σταδιακά περισσότερες ζώνες αδυναμίας του υπεδάφους. Οι ολισθήσεις διακρίνονται σε:

- *Περιστροφικές (Rotational slides)*. Ολισθήσεις κατά μήκος κοίλων επιφανειών διατμητικής αστοχίας και με μικρή παραμόρφωση στο εσωτερικό της μετακινούμενης μάζας (Σχήμα 1.4). Θεωρείται η συνηθέστερη μορφή κατολίσθησης και καταγράφεται συχνότερα σε εδαφικούς σχηματισμούς.



Σχήμα 1.4. Τυπική μορφή περιστροφικής κατολίσθησης. Πηγή: (Σταυροπούλου, 2015).

- *Μεταθετικές ολισθήσεις (Translational slides)*. Σε αυτή την περίπτωση, η μάζα που αποσπάται μετακινείται προς τα κατόντη κατά μήκος μιας σχεδόν επίπεδης ή ελαφρώς κυματοειδούς επιφάνειας, με μικρή περιστροφή ή στροφή προς τα πίσω της κεφαλής. Χαρακτηριστική περίπτωση μεταθετικής ολίσθησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.5.

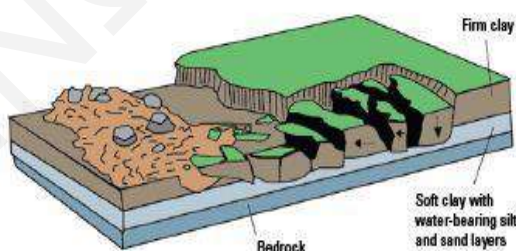


Σχήμα 1.5. Τυπική περίπτωση μεταθετικής κατολίσθησης. Πηγή: (Σταυροπούλου, 2015).

- *Σύνθετες ολισθήσεις (Compound slides)*. Οι σύνθετες ολισθήσεις αποτελούν συνδυασμό των δυο προηγούμενων περιπτώσεων, δηλαδή ένα τμήμα της ολισθαίνουσας μάζας (συνήθως το κεντρικό) κινείται μεταθετικά ενώ το υπόλοιπο περιστροφικά. Στις σύνθετες ολισθήσεις, το ανάντη τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης είναι κοίλο και ακολουθείται από ένα επίπεδο τμήμα το οποίο είτε εκτείνεται μέχρι τον πόδα είτε καταλήγει σε ένα δεύτερο (κατάντη) κοίλο τμήμα.

Πλευρικές εξαπλώσεις (Lateral spreads)

Πλευρικές εξαπλώσεις παρατηρούνται σε πρηνή μικρής κλίσης και η κίνηση που κυριαρχεί είναι η πλευρική επέκταση συνοδευόμενη από διατμητικές και εφελκυστικές ρωγμές (Σχήμα 1.6).



Σχήμα 1.6. Τυπική περίπτωση πλευρικών εξαπλώσεων. Πηγή: (Σταυροπούλου, 2015).

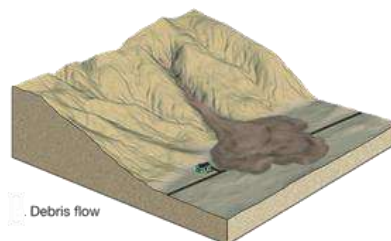
Οι πλευρικές εξαπλώσεις χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- *Εξάπλωση τεμαχών (block spreads)*. Εκδηλώνεται σε βραχώδεις γεωλογικούς σχηματισμούς, οι οποίοι υπέρκεινται πολύ ασθενέστερων σχηματισμών. Οι βραχώδεις σχηματισμοί κατατμώνται από ρωγμές και η μετατόπιση κατανέμεται σχεδόν σε όλη την έκταση χωρίς σαφή επιφάνεια διάτμησης ή ζώνη πλαστικής ροής εντός του ασθενούς σχηματισμού.

- *Εξάπλωση λόγω ρευστοποίησης (liquefaction spreads)*. Εκδηλώνονται σε ευαίσθητες αργίλους ή άλλους ρευστοποιήσιμους σχηματισμούς υπό οιονεί στατικές συνθήκες. Η θραύση γίνεται προοδευτικά, με ή χωρίς περιστροφή, από την αρχική θέση και διαδιδόμενη προς τα ανάντη. Το φαινόμενο ξεκινά συνήθως χωρίς κάποια προειδοποίηση και εξελίσσεται πολύ γρήγορα. Πλευρική εξάπλωση μπορεί να προκληθεί επίσης από σεισμικά γεγονότα σε ρευστοποιήσιμα κορεσμένα χονδρόκοκκα εδάφη. Σε αυτή την περίπτωση, οι μετακινήσεις εκδηλώνονται κατά τη διάρκεια (και λίγο μετά) του σεισμικού γεγονότος.
- *Σύνθετη πλευρική εξάπλωση (complex spreads)*. Μετακινήσεις με ιδιαίτερα έντονες παραμορφώσεις οριζόντιων και διερρηγμένων στρωμάτων που υπέρκεινται ρηγματωμένων αργίλων.

Ροές (Flows)

Οι ροές παρατηρούνται σε χαλαρά υλικά αλλά και πολύ κατακερματισμένους βραχώδεις σχηματισμούς. Μπορούν να είναι υγρές ή ξηρές, γρήγορες ή αργές, ενώ η μετακινούμενη μάζα παραμορφώνεται έντονα. Στην περίπτωση που η ταχύτητα μετακίνησης είναι πολύ αργή κατατάσσονται στον ερπυσμό, όπου η μετατόπιση δεν διακρίνεται με ευκολία. Σε βραχώδεις σχηματισμούς (rock flows), οι παραμορφώσεις κατανέμονται μεταξύ μεγάλων ή μικρών ασυνεχειών, χωρίς όμως να εντοπίζεται μετατόπιση κατά μήκος μιας επιφάνειας. Ομοίως, στις ροές κορημάτων (debris flows) δεν είναι ορατή η επιφάνεια ολίσθησης (Σχήμα 1.7). Σε πρανή που έχουν μεγάλη κλίση και η περιεκτικότητα σε νερό είναι υψηλή, οι ροές κορημάτων μπορεί να εκδηλωθούν με πολύ μεγάλες ταχύτητες (debris avalanche).



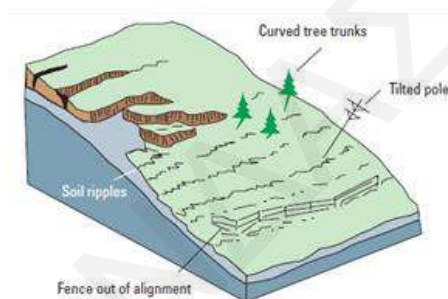
Σχήμα 1.7. Τυπική μορφή ροής κορημάτων. Πηγή: (Σταυροπούλου, 2015).

Σύνθετες κινήσεις (Complex slides)

Αποτελούν συνδυασμό δύο ή και περισσότερων από τους παραπάνω τύπους κατολισθήσεων, οι οποίοι δύνανται να εκδηλωθούν σε οποιοδήποτε τμήμα της μετακινούμενης μάζας αλλά και σε κάθε φάση εξέλιξης της μετακίνησης.

Ερπυσμός (Creep)

Το επιφανειακό στρώμα (εδαφικό κάλυμμα) μετακινείται με ρυθμό που δεν υπερβαίνει τα μερικά εκατοστά/έτος. Το φαινόμενο γίνεται αντιληπτό από την κλίση των δένδρων. Παρατηρείται σε όλη την έκταση της επιφάνειας του πρανούς παρουσιάζοντας κυματοειδείς μορφές. Μια τυπική περίπτωση ερπυσμού παρατίθεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 1.8. Τυπική περίπτωση ερπυσμού. Πηγή: (Σταυροπούλου, 2015).

1.1.3.2 Ταξινόμηση κατολισθήσεων με βάση την ταχύτητα

Η ταχύτητα μιας κατολίσθησης αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της διότι καθορίζει το διαθέσιμο χρόνο για τη διαχείριση της κατολίσθησης και την όποια δυνατότητα λήψης κατάλληλων μέτρων για την αποτροπή απώλειας ανθρωπίνων ζώων και καταστροφών σε κτίρια και υποδομές. Συνεπώς, η εκτίμηση της ταχύτητας μιας κατολίσθησης είναι ιδιαίτερα σημαντική, αλλά παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου. Πιο συγκεκριμένα η ταχύτητα μιας κατολίσθησης μπορεί να παρουσιάζει διαφορετικές τιμές σε κάθε σημείο της έκτασής της, οι οποίες μάλιστα να είναι χρονικά μεταβαλλόμενες.

Ο Varnes (1978) πρότεινε μια ταξινόμηση των κατολισθήσεων με βάση την ταχύτητά τους, η οποία περιλάμβανε επτά κατηγορίες. Η αρχική πρόταση του Varnes (1978) αναθεωρήθηκε ακολούθως από τους Cruden & Varnes (1996). Οι δύο αυτές κατατάξεις παρατίθενται στον Πίνακα 1.3. Με βάση την ταξινόμηση των Cruden & Varnes (1996), οι περισσότερες περιστροφικές και μεταθετικές ολισθήσεις σε φυσικά πρανή στην Κύπρο κατατάσσονται ως αργές έως εξαιρετικά αργές.

Πίνακας 1.3. Ταξινόμηση κατολισθήσεων με βάση την ταχύτητα. Πηγή : (Cruden & Varnes, 1996).

Κατηγορία ταχύτητας μετακίνησης	Περιγραφή	Varnes (1978)	Cruden & Varnes (1996)
		Τυπική ταχύτητα	Τυπική ταχύτητα
7	Εξαιρετικά γρήγορη	> 3 m/sec	> 5 m/sec
6	Πολύ γρήγορη	0.3 m/min	3 m/min
5	Γρήγορη	36 m/hour	1.8 m/hour
4	Μέτρια	1.5 m/month	13 m/month
3	Αργή	1.5 m/year	1.6 m/year
2	Πολύ αργή	60 mm/year	16 mm/year
1	Εξαιρετικά αργή	< 60 mm/year	< 16 mm/year

1.1.4. Ενεργότητα κατολίσθησης

Η ενεργότητα μιας κατολίσθησης όπως ορίστηκε από την ομάδα εργασίας (International Geotechnical Societies) της UNESCO (1993) περιλαμβάνει τις εξής κατηγορίες:

α) *Ενεργές κατολισθήσεις (active)*. Περιλαμβάνει τις κατολισθήσεις οι οποίες εμφανίζουν μετακινήσεις στον παρόντα χρόνο.

β) *Παροδικά ανενεργές ή υπό αναστολή κατολισθήσεις (suspended)*. Πρόκειται για κατολισθήσεις που παρουσίασαν μετακινήσεις κατά το τελευταίο έτος και οι οποίες κατά την παρούσα περίοδο δεν μετακινούνται.

γ) *Ανενεργές κατολισθήσεις (inactive)*. Κατολισθήσεις οι οποίες έδωσαν μετακινήσεις για τελευταία φορά σε διάστημα που ξεπερνά το ένα έτος. Οι ανενεργές κατολισθήσεις χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Κατολισθήσεις που βρίσκονται σε αδράνεια / εν υπνώσει (*dormant*), στις οποίες τα αίτια που προκαλούν την κατολίσθηση παραμένουν.
- Εκλιπούσες κατολισθήσεις (*abandoned*), στις οποίες τα αίτια που προκάλεσαν την κατολίσθηση έχουν εκλείψει.
- Υπολειμματικές/«απολιθωμένες» κατολισθήσεις (*relict*), οι οποίες δεν έχουν ενεργοποιηθεί για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα και είναι εξαιρετικά απίθανο να ενεργοποιηθούν ξανά διότι αναπτύχθηκαν υπό εντελώς διαφορετικές γεωμορφολογικές και κλιματικές συνθήκες.
- Σταθεροποιημένες κατολισθήσεις (*stabilized*), για τις οποίες έχουν ληφθεί μέτρα προστασίας και σταθεροποίησης.

δ) *Επανενεργοποιημένες κατολισθήσεις (reactivated)*. Πρόκειται για κατολισθήσεις οι οποίες υπήρξαν για κάποιο χρονικό διάστημα (μικρό ή μεγάλο) ανενεργές και εμφανίζουν ξανά μετατοπίσεις. Οι περιστροφικές/μεταθετικές ολισθήσεις που έχουν ενεργοποιηθεί ξανά μετακινούνται σε προϋπάρχουσες επιφάνειες ολίσθησης των οποίων οι παράμετροι αντοχής προσεγγίζουν τις παραμένουσες τιμές.

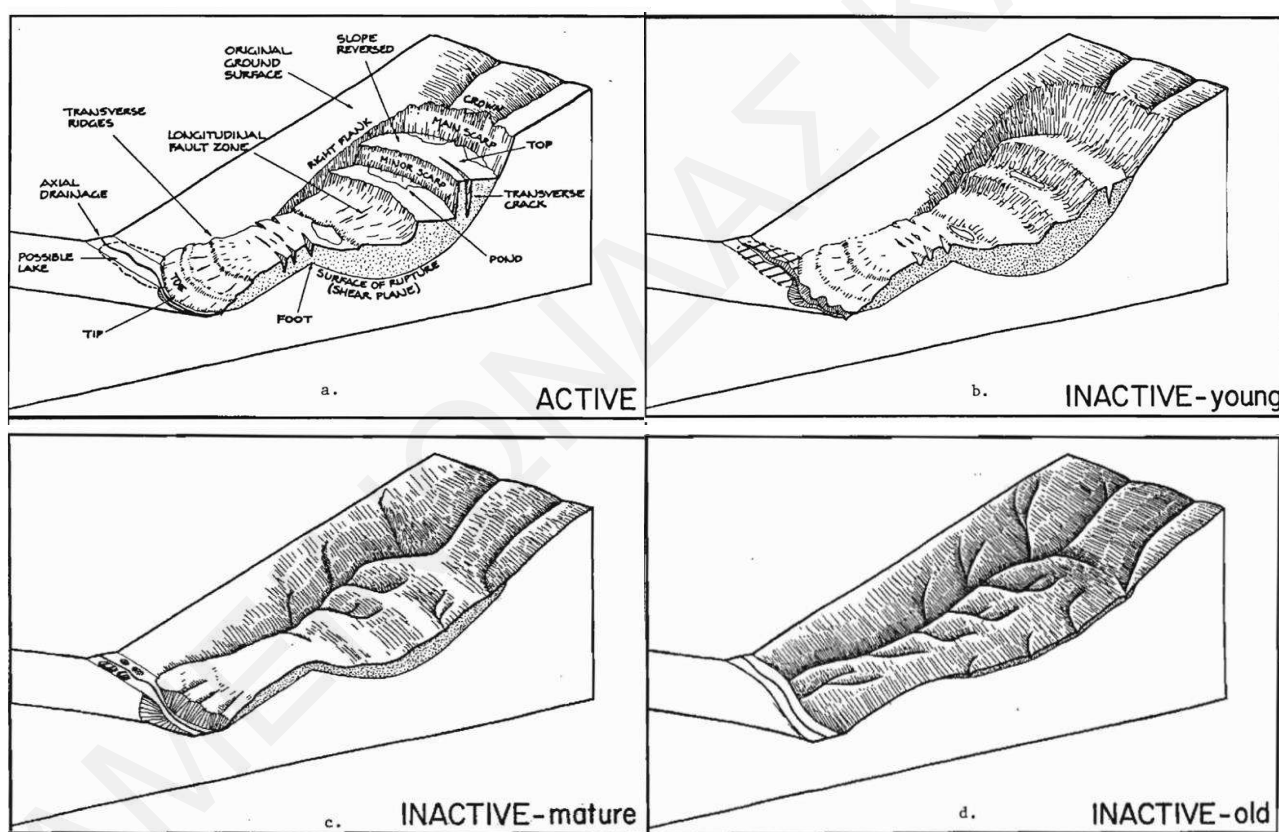
Το έδαφος στην επιφάνεια της γης υπόκειται διαρκώς σε διαβρωτικούς παράγοντες της ατμόσφαιρας (βροχή, άνεμος, CO₂). Όσο μια ολίσθηση είναι ενεργή, τα γεωμορφολογικά της χαρακτηριστικά (Σχήμα 1.1) παραμένουν σαφή και έντονα. Από τη στιγμή που μια ολίσθηση καταστεί ανενεργή (παλαιοκατολίσθηση), η διάβρωση αμβλύνει σταδιακά τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της. Βασιζόμενος σε αυτό το φαινόμενο, ο McCalpin (1984) κατατάσσει τις κατολισθήσεις στις παρακάτω τέσσερις κατηγορίες, οι οποίες παρουσιάζονται επίσης στο Σχήμα 1.9.

α) *Ενεργές (Active)*: Κατολισθήσεις που έχουν εμφανίσει μετακινήσεις τον τελευταίο αιώνα και εμφανίζουν στο ακέραιο τα χαρακτηριστικά τους (Σχήμα 1.9α).

β) *Ανενεργές – Νέες (Inactive – Young)*: Κατολισθήσεις που έχουν δώσει μετακινήσεις στο πολύ πρόσφατο γεωλογικό παρελθόν. Αυτές οι κατολισθήσεις διατηρούν ακόμη σε μεγάλο βαθμό τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά μιας ενεργούς κατολίσθησης (Σχήμα 1.9β), όπως οι κατακρημνίσεις, οι ρωγμές (εγκάρσιες και διαμήκεις) και οι συσσωρεύσεις νερού της βροχής σε σημεία ανάστροφης κλίσης του εδάφους (ponds).

γ) *Ανενεργές – Ωριμες (Inactive – Mature)*: Σε αυτή την περίπτωση, η διάβρωση έχει αμβλύνει σε μεγάλο βαθμό την κύρια κατακρήμιση και τις δευτερεύουσες κατακρημνίσεις. Δεν παρατηρούνται πλέον ρηγματώσεις στην επιφάνεια του εδάφους και σημεία που λιμνάζουν νερά. Κατά μήκος των πλευρικών ορίων της κατολίσθησης έχουν πλέον σχηματιστεί άξονες απορροής που καταλήγουν στον πόδα (Σχήμα 1.9γ).

δ) *Ανενεργές – Παλαιές (Inactive – Old)*: Η μακροχρόνια έκθεση σε διάβρωση έχει καταστήσει τα χαρακτηριστικά της κατολίσθησης μη αναγνωρίσιμα. Απουσιάζουν ρωγμές και κατακρημνίσεις. Το μόνο που προδίδει τη γεωγραφική θέση και έκταση της παλαιοκατολίσθησης είναι η σχετική βύθιση του ανάγλυφου και ένα υδρογραφικό δίκτυο με κλειστή γεωμετρία που διατρέχει τα παλαιά της όρια (Σχήμα 1.9δ).



Σχήμα 1.9. Αμβλυνση των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών των κατολισθήσεων με τον χρόνο (McCalpin 1984).

Με δεδομένα και παρατηρήσεις στα βορειοδυτικά της πολιτείας Wyoming των Ηνωμένων Πολιτειών (βόρεια Βραχώδη Όρη), ο McCalpin (1984) αντιστοίχησε ηλικία στις παραπάνω κατηγορίες ανενεργών κατολισθήσεων (παλαιοκατολισθήσεων), δηλαδή μέγεθος χρονικού διαστήματος από την τελευταία φορά που ήταν ενεργές, ως ακολούθως:

- Νέες: 100 – 5000 χρόνια
- Ωριμες: 5000 – 10000 χρόνια
- Παλαιές: >10000 χρόνια

Σε ότι αφορά τα παραπάνω ηλικιακά όρια, θα πρέπει να επισημανθεί ότι είναι ενδεικτικά και αντικατοπτρίζουν την έντονη διάβρωση που προκαλείται στο βροχερό κλίμα του βορειοδυτικού Wyoming (~1000mm μέση ετήσια βροχόπτωση). Είναι εύλογο να υποθεθεί ότι σε περιοχές με άνυδρο κλίμα (όπως οι πεδινές και παράκτιες περιοχές της Κύπρου) αυτά τα ηλικιακά όρια ενδέχεται να είναι πολύ μεγαλύτερα, αφού θα απαιτείται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για να διαβρωθούν τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά μιας παλαιοκατολίσθησης.

1.1.5. Αίτια των κατολισθήσεων

Παράγοντες που μπορεί να αποτελέσουν τα αίτια εκδήλωσης και εξέλιξης ενός κατολισθητικού φαινομένου σύμφωνα με τους Ευθυμίου και Χατζηχαραλάμπους (2013) είναι:

- α) Το είδος των γεωλογικών σχηματισμών.
- β) Αύξηση της κλίσης ή του ύψους του πρανούς ως αποτέλεσμα ανθρωπογενών επεμβάσεων.
- γ) Οι περιστασιακοί ισχυροί σεισμοί ή τοπικές εκρήξεις.
- δ) Η μεταβολή της στάθμης του υπόγειου νερού ή/και της περιεχόμενης υγρασίας των στρωμάτων του πρανούς.
- ε) Η δημιουργία απότομων κλίσεων από τη διάβρωση που προκαλούν ποτάμια και ρέματα.
- στ) Η ανάπτυξη/διακλάδωση του επιφανειακού νερού διαμέσου των ρωγμών και των αδύνατων ζωνών των πετρωμάτων, συμπεριλαμβανομένων των εποχιακών πηγών.
- ζ) Οι χειμερινές βροχοπτώσεις που εμφανίζονται ως έντονα γεγονότα καταιγίδων και η επίδραση παγετού.
- η) Η αποσάθρωση.
- θ) Η μεταβολή της βλάστησης.
- ι) Η υπερβολική επιβάρυνση του πρανούς από μεγάλες κατασκευές.

1.1.6. Μέτρα αντιμετώπισης

Σημαντικός τρόπος αντιμετώπισης των κατολισθητικών φαινομένων μπορεί να θεωρηθεί η πρόληψη, η οποία στοχεύει στην αποφυγή μεγάλων επεμβάσεων στην εδαφική και υδατική ισορροπία ή ανάπτυξης γης και κατασκευής υποδομών σε κατολισθαίνουσες περιοχές (ή περιοχές με υψηλή κατολισθητική επικινδυνότητα). Όμως σχέδια και δράσεις πρόληψης δυστυχώς σπάνια υλοποιούνται, και στις περισσότερες των περιπτώσεων η διαπίστωση του προβλήματος γίνεται καθυστερημένα, με αποτέλεσμα η λήψη μέτρων σταθεροποίησης να καθίσταται αναγκαία. Η επιλογή των κατάλληλων μέτρων σταθεροποίησης γίνεται επιδιώκοντας είτε τον περιορισμό των παραγόντων που επιδρούν θετικά ως προς το φαινόμενο των μετακινήσεων είτε την ενίσχυση εκείνων που αντιστέκονται σε αυτό.

Όπως αναφέρει ο Popescu (2002) η επιτροπή αποκατάστασης κατολισθήσεων του International Union of Geological Sciences (IUGS) - Working Group on Landslides (WG/L) κατηγοριοποίησε τα διορθωτικά μέτρα στις εξής τέσσερις ομάδες:

- Τροποποίηση της γεωμετρίας των πρανών
- Αποστράγγιση
- Κατασκευές στήριξης
- Εσωτερική ενίσχυση των πρανών

Πιο συγκεκριμένα τα μέτρα που εντάσσονται σε κάθε μια από τις τέσσερις ομάδες παρατίθενται στον Πίνακα 1.4 που ακολουθεί.

Πίνακας 1.4. Μέτρα σταθεροποίησης κατολισθήσεων. Πηγή : (Popescu, 2002).

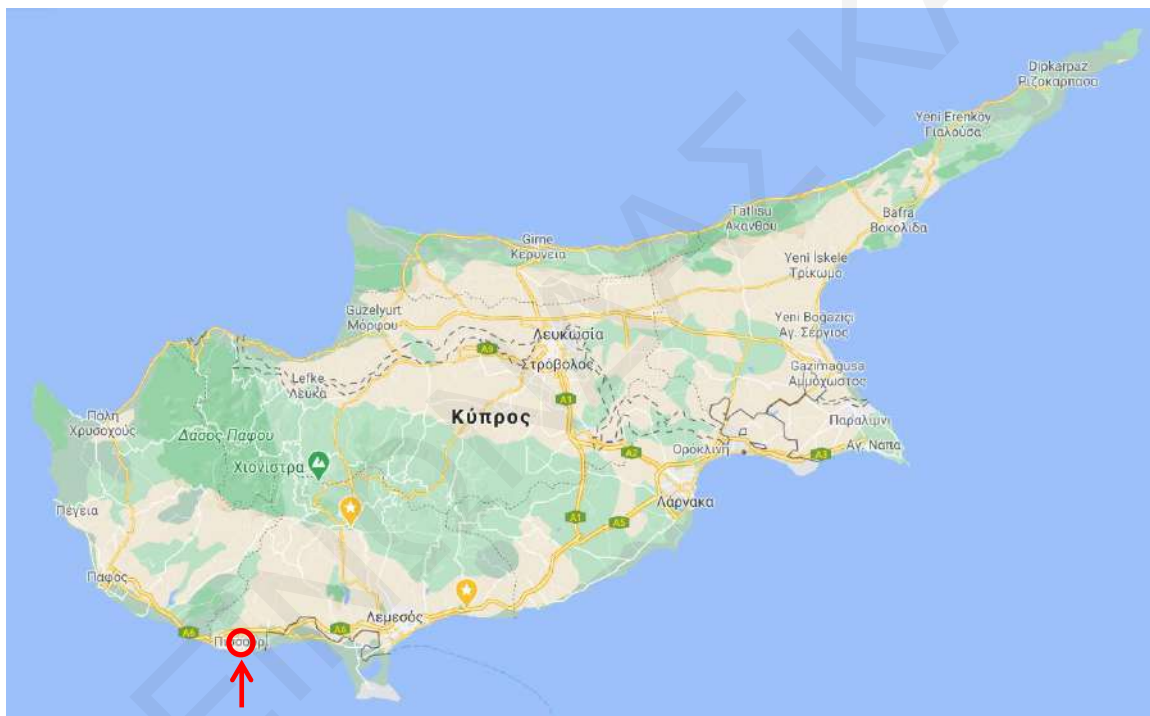
A. Τροποποίηση της γεωμετρίας των πρανών	
1.	Αφαίρεση υλικού από το ανάντη τμήμα της κατολίθησης (με πιθανή αντικατάσταση από ελαφρύ υλικό, όπως τεμάχια geofam)
2.	Προσθήκη υλικού (έδαφος ή λιθορριπή) στην περιοχή του ποδός (επίχωμα ποδός ή αντίβαρο)
3.	Μείωση γενικά της γωνίας κλίσεως του πρανούς
B. Αποστράγγιση	
1.	Επιφανειακή στράγγιση της επιφάνειας του εδάφους, (συλλεκτήριες τάφροι και σωλήνες)
2.	Ρηχά ή βαθιά ορύγματα πληρωμένα από πολύ διαπερατά χονδρόκοκκα υλικά και γεωσυνθετικά
3.	Αντηρίδες από λιθορριπή (υδρολογική επίδραση)
4.	Κατακόρυφες γεωτρήσεις μικρής διαμέτρου με άντληση ή αυτό-στράγγιση
5.	Κατακόρυφα (μεγάλης διαμέτρου) φρεάτια με στράγγιση βαρύτητας
6.	Υπο-οριζόντιες ή υπο-κατακόρυφες διατρήσεις (στραγγιστήρια)

Πίνακας 1.4 (συνέχεια)

7.	Σήραγγες, γαλαρίες και στοές αποστράγγισης
8.	Απομάκρυνση νερού με χρήση κενού (vacuum)
9.	Στράγγιση με σιφωνισμό
10.	Ηλεκτρο-οσμωτική απομάκρυνση νερού
11.	Φύτευση βλάστησης (απορρόφηση/συγκράτηση νερού από ρίζες)
Γ. Κατασκευές στήριξης	
1.	Τοίχοι βαρύτητας
2.	Φατνωματικοί τοίχοι (crib walls)
3.	Τοίχοι από συρματοκιβώτια
4.	Παθητικοί πάσσαλοι, βάρθρα και κιβώτια
5.	Επιτόπου τοίχοι έγχυτου οπλισμένου σκυροδέματος
6.	Έργα συγκράτησης εδαφών από οπλισμένη γη (με γεωπλέγματα, γεωϋφάσματα ή μεταλλικά στοιχεία ενίσχυσης)
7.	Αντηρίδες από λιθορριπή
8.	Δίχτυα συγκράτησης των μετώπων βραχωδών πρανών
9.	Συστήματα μείωσης ή ανάσχεσης καταπτώσεων βράχων (τάφροι, πάγκοι, δίχτυα και τοίχοι ανάσχεσης)
10.	Τεμάχια βράχων/μπλοκ σκυροδέματος για την προστασία από διάβρωση
Δ. Εσωτερική ενίσχυση των πρανών	
1.	Κοχλιώσεις βράχων
2.	Μικροπάσσαλοι
3.	Ηλώσεις εδάφους
4.	Αγκυρώσεις (προεντεταμένες ή μη)
5.	Τσιμεντένευσεις
6.	Διατμητικές κλείδες (από θραυστό υλικό ή ασβέστη/τσιμέντο)
7.	Θερμική επεξεργασία
8.	Πάγωμα
9.	Ηλεκτρο-οσμωτικές αγκυρώσεις
10.	Φύτευση βλάστησης (μηχανική ενίσχυση από ρίζες φυτών)

1.2. Αντικείμενο της παρούσας ερευνητικής εργασίας

Η παρούσα μελέτη πραγματεύεται ένα κατολισθητικό φαινόμενο που άρχισε να γίνεται αντιληπτό τον χειμώνα του 2011/2012 στη θέση «Λίμνες» της κοινότητας Πισσουρίου της Επαρχίας Λεμεσού. Το Πισσούρι βρίσκεται στο νοτιοδυτικό τμήμα της Κύπρου (Σχήμα 1.10). Διοικητικά υπάγεται στην Επαρχία Λεμεσού και πιο συγκεκριμένα τα δυτικά του σύνορα εντοπίζονται στα όρια των Επαρχιών Λεμεσού και Πάφου. Συνδέεται οδικά και με τα δυο αστικά κέντρα μέσω του αυτοκινητοδρόμου Λεμεσού - Πάφου και απέχει από την πόλη της Λεμεσού 31 χιλιόμετρα.



Σχήμα 1.10. Χάρτης της Κύπρου με την Κοινότητα Πισσουρίου να εντοπίζεται στο νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού. Πηγή : (Google Maps, 2021).

Το Πισσούρι είναι χτισμένο σε μέσο υψόμετρο 240 μέτρων και το ανάγλυφο της περιοχής είναι ιδιαίτερα λοφώδες. Στα νότια, η κοινότητα εκτείνεται μέχρι τη θαλάσσια ακτή. Περίπου 3 χιλιόμετρα στα νοτιοανατολικά του οικισμού βρίσκεται ο κόλπος του Πισσουρίου, με το ακρωτήριο Άσπρο στο δυτικό του άκρο (Μεγάλη Κυπριακή Εγκυκλοπαίδεια, 2021). Η παλιά πόλη του Πισσουρίου χρονολογείται από τη Βυζαντινή περίοδο. Η κοινότητα Πισσουρίου αρχικά αναπτύχθηκε στην κορυφή ενός λόφου, ενώ τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της έντονης τουριστικής ανάπτυξης, ο οικισμός επεκτάθηκε

στις κλιτύες του λόφου αλλά και σε παρακείμενους λόφους. Σημαντικό τμήμα της κοινότητας είναι χτισμένο πάνω σε μάργα του Πλειόκαινου (μάργα του γεωλογικού σχηματισμού Λευκωσίας), ένα υλικό επιρρεπές σε κατολισθήσεις, ειδικότερα έπειτα από παρατεταμένες περιόδους βροχοπτώσεων. Ο πληθυσμός της Κοινότητας Πισσουρίου προσεγγίζει τους 2000 κατοίκους.

Στο δυτικό και νοτιοδυτικό τμήμα της Κύπρου σημειώνεται γενικά μεγάλος αριθμός κατολισθήσεων ως αποτέλεσμα της παρουσίας αδύναμων γεωλογικών σχηματισμών σε έντονο ανάγλυφο και της μεγαλύτερης έντασης βροχοπτώσεων σε σχέση με την υπόλοιπη Κύπρο. Για παράδειγμα, τον χειμώνα του 2001-2002, μια αρκετά υγρή χειμερινή περίοδο, σημειώθηκε κατολίσθηση στην βορειοανατολική κλιτύ του οικισμού επί της οδού Ανεξαρτησίας, ενεργοποιώντας περίπου 80000m³ εδάφους και καταστρέφοντας ολοκληρωτικά τρεις κατοικίες. Οι Alexandris et al. (2017) αναφέρουν ότι κατά τις υγρές περιόδους παρατηρείτο εντονότερος ρυθμός μετακίνησης της εδαφικής μάζας σε σύγκριση με τους θερινούς μήνες. Ο μέσος μηνιαίος ρυθμός μετακίνησης εκτιμάται ότι ήταν κοντά στα 3cm, με αποτέλεσμα έπειτα από την πάροδο δέκα ετών η κατολίσθηση να συσσωρεύσει μετακίνηση 3-3.5m. Η εν λόγω κατολίσθηση σταθεροποιήθηκε με την τοποθέτηση επιχώματος ποδός (αντίβαρο) και φρεατοπασσάλων που κατασκευάστηκαν την περίοδο 2011-2013. Οι τρεις κατοικίες που βρίσκονταν επί της ολισθαίνουσας μάζας κατεδαφίστηκαν και ο δρόμος ανακατασκευάστηκε, ενώ κατοικίες οι οποίες βρίσκονταν ανάντη του δρόμου και πίσω από την κύρια κατακρήμνιση κρίθηκαν μακροχρόνια επισφαλείς και απαιτήθηκε η λήψη μέτρων σταθεροποίησης της κύριας κατακρήμνισης (προεντεταμένες αγκυρώσεις).

Σχεδόν 10 χρόνια μετά από την εκδήλωση της κατολίσθησης στην οδό Ανεξαρτησίας, άρχισαν να παρατηρούνται ζημιές σε οικίες σε μια περιοχή που βρίσκεται νοτιότερα (περιοχή «Λίμνες»). Σημαντικές είναι οι ζημιές που προκλήθηκαν με την έναρξη της κατολίσθησης, αλλά και σε βάθος χρόνου μέχρι σήμερα λόγω της συνεχιζόμενης ολίσθησης της εδαφικής μάζας. Αρκετά χρόνια μετά την έναρξη του φαινομένου εξακολουθούν να προκαλούνται ζημιές. Χαρακτηριστικές ζημιές παρουσιάζονται στα Σχήματα 1.11 έως 1.17. Η μελέτη της εξέλιξης του φαινομένου και η αναζήτηση των αιτίων του, σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά του εδάφους της περιοχής, παρουσιάζουν έντονο επιστημονικό ενδιαφέρον, και η εύρεση λύσης στο πρόβλημα ευστάθειας αποτελεί επιστημονική πρόκληση αλλά ταυτόχρονα και ουσιώδη ανάγκη για την τοπική κοινωνία.



Σχήμα 1.11. Κατεστραμμένη κατοικία στο Πισσούρι.



Σχήμα 1.12. Μεγάλες ρωγμές σε κατοικία στο Πισσούρι.



Σχήμα 1.13. Κατεστραμμένο τμήμα του οδικού δικτύου στο Πισσούρι.



Σχήμα 1.14. Ρωγμές στην επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 1.15. Κατοικία με μέρος της θεμελίωσης να μην στηρίζεται πλέον στο έδαφος.



Σχήμα 1.16. Κατάρρευση τοίχου αντιστήριξης σε κατοικία, της οποίας μέρος της θεμελίωσης δεν στηρίζεται πλέον στο έδαφος.



Σχήμα 1.17. Σημαντικές ζημιές και έντονες ρωγμές σε κατοικία που έχει πάρει κλίση.

Η παρούσα μελέτη βασίζεται κυρίως σε δεδομένα που ήταν ήδη διαθέσιμα ή θα μπορούσαν να είναι διαθέσιμα μέσω των συνήθων γεωτεχνικών ερευνών πριν τα μέσα της δεκαετίας του 2000, με στόχο να αναδείξει τη μεθοδολογία για έγκαιρη διάγνωση της φύσης και έκτασης ενός κατολισθητικού προβλήματος από μηχανικούς και γεωλόγους πριν τη διενέργεια εκτεταμένης και λεπτομερούς γεωτεχνικής έρευνας της περιοχής.

1.3. Διάρθρωση της παρούσας ερευνητικής εργασίας

Η παρούσα μελέτη της κατολίσθησης στην περιοχή «Λίμνες» της κοινότητας Πισσουρίου απαρτίζεται από πέντε κεφάλαια, το περιεχόμενο των οποίων περιγράφεται συνοπτικά παρακάτω.

Στο 1^ο κεφάλαιο έγινε εισαγωγή στα κατολισθητικά φαινόμενα και παρουσιάζεται το αντικείμενο μελέτης της διπλωματικής εργασίας.

Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της περιοχής του Πισσουρίου που αφορούν σε γεωλογικά, υδρογεωλογικά, γεωμορφολογικά, κλιματολογικά και δημογραφικά στοιχεία.

Το 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζει την μεθοδολογία της ανάλυσης. Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου καταστρώνεται η στρωματογραφική τομή της περιοχής της κατολίσθησης, η οποία βασίστηκε σε γεωλογικούς και τοπογραφικούς χάρτες. Επιπρόσθετα γίνεται εκτίμηση του υδροφόρου ορίζοντα αξιοποιώντας στοιχεία γεωτρήσεων του Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα διαθέσιμα στη βιβλιογραφία στοιχεία σχετικά με τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών υλικών που εμπλέκονται σε κατολισθήσεις στην Κύπρο, και βάσει αυτών γίνεται εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής της μάργας Λευκωσίας στην υπό μελέτη κατολίσθηση. Το κεφάλαιο κλείνει με λεπτομερή περιγραφή της μοντελοποίησης της κατολίσθησης στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 2D.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αντίστροφων αναλύσεων για τον προσδιορισμό της θέσης και της γεωμετρίας της επιφάνειας ολίσθησης, του κρίσιμου ύψους του υδροφόρου ορίζοντα, και τις πλέον πιθανές τιμές των παραμέτρων αντοχής επί της επιφάνειας ολίσθησης.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τρία σενάρια μέτρων που προτείνονται για τη σταθεροποίηση της κατολίσθησης στο Πισσούρι και ακολούθως γίνεται εκτίμηση του κόστους κάθε σεναρίου.

Στο 6^ο κεφάλαιο παρατίθενται και σχολιάζονται τα σημαντικότερα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, τα οποία συμβάλουν στην καλύτερη κατανόηση των συνθηκών που κυριαρχούν στην περιοχή και υπό τις οποίες εκδηλώνεται η κατολίσθηση. Σε αυτά περιλαμβάνονται δημογραφικά, κλιματολογικά, υδρογεωλογικά και γεωλογικά στοιχεία καθώς και στοιχεία σεισμικότητας.

2.1. Δημογραφικά στοιχεία

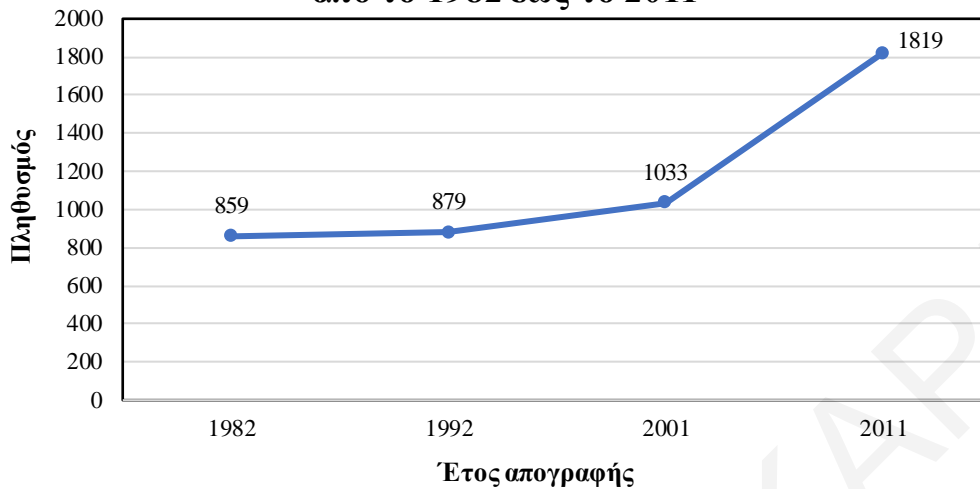
Η Κοινότητα Πισσουρίου ανήκει στην Επαρχία Λεμεσού και αποτελεί το τρίτο μεγαλύτερο σε διοικητική έκταση (37.93 km²) χωριό της. Ο πληθυσμός της Κοινότητας Πισσουρίου βάσει των στοιχείων της Στατιστικής Υπηρεσίας από τις απογραφές του 1982, 1992, 2001 και του 2011, παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.1. Συγκεκριμένα το 1982 καταγράφηκαν 859 μόνιμοι κάτοικοι, 879 το 1992, 1033 το 2001, ενώ μέσα στην δεκαετία που ακολούθησε (2001-2011) καταγράφεται σημαντική αύξηση (κατά 76%) φθάνοντας τους 1819.

Πίνακας 2.1. Πληθυσμιακά στοιχεία Κοινότητας Πισσουρίου. Πηγή : (Στατιστική Υπηρεσία, 2011).

	Απογραφή 1982	Απογραφή 1992	Απογραφή 2001	Απογραφή 2011
Πληθυσμός	859	879	1033	1819

Η πληθυσμιακή μεταβολή της Κοινότητας Πισσουρίου από το 1982 έως το 2011 παρουσιάζει αυξητική τάση και παρατίθεται στο Σχήμα 2.1. Αξίζει να σημειωθεί ότι πέρα από τους μόνιμους κατοίκους, ο πληθυσμός αυξάνεται κατακόρυφα τους θερινούς μήνες, φτάνοντας ακόμη και τους 12000 κατοίκους λόγω της έντονης τουριστικής ανάπτυξης, αφού μεγάλο ποσοστό των κατοικιών είναι παραθεριστικές.

Πληθυσμιακή μεταβολή Κοινότητας Πισσουρίου από το 1982 έως το 2011



Σχήμα 2.1. Διάγραμμα πληθυσμιακής μεταβολής της Κοινότητας Πισσουρίου από το 1982 έως το 2011. Πηγή : (Στατιστική Υπηρεσία, 2011).

2.2. Κλιματολογικά στοιχεία

Το Πισσούρι χαρακτηρίζεται από τυπικό μεσογειακό κλίμα με ήπιους χειμώνες και θερμά και ξηρά καλοκαίρια. Οι μέγιστες θερμοκρασίες, οι οποίες σημειώνονται τον Ιούλιο και τον Αύγουστο, υπερβαίνουν τους 30°C, ενώ τους χειμερινούς μήνες η θερμοκρασία πέφτει μεταξύ 14-20°C.

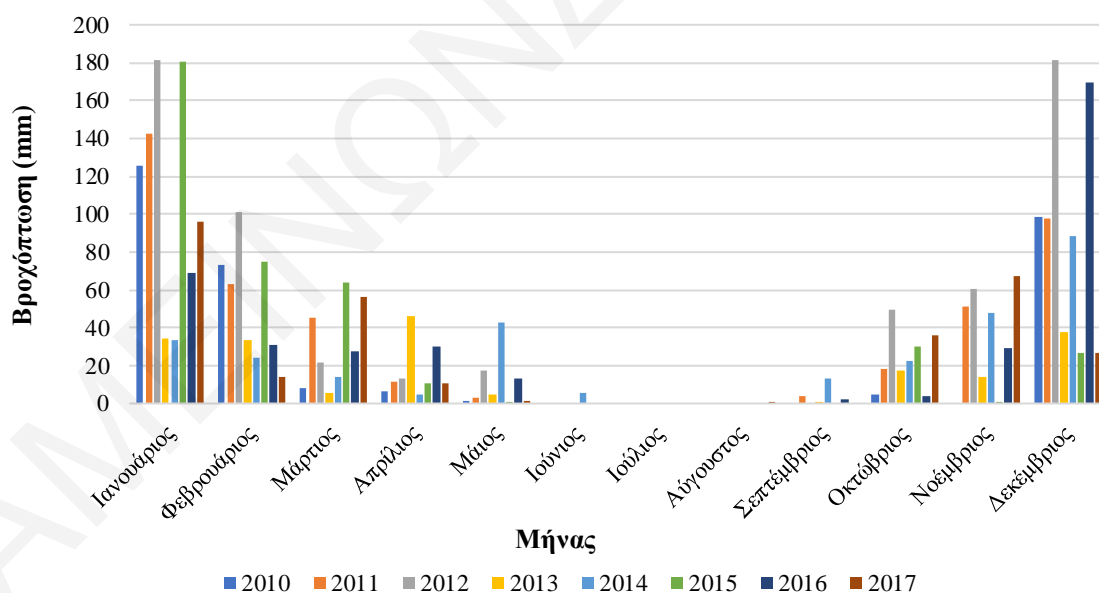
Η μέση ετήσια βροχόπτωση με βάση τα στοιχεία του Τμήματος Μετεωρολογίας, του σταθμού της Λεμεσού (Δημοτικός Κήπος), για το διάστημα 2010-2017 εκτιμάται στα 368mm. Ο Δεκέμβρης και ο Ιανουάριος είναι συνήθως οι πιο βροχεροί μήνες ενώ Ιούνιος, Ιούλιος και Αύγουστος οι πιο ξηροί με μηδαμινές βροχοπτώσεις, όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό από το γράφημα του Σχήματος 2.2. Οι τιμές της μηνιαίας βροχόπτωσης για το χρονικό διάστημα 2010-2017 παρατίθενται επίσης στον Πίνακα 2.2.

Στο γράφημα του Σχήματος 2.2 γίνεται συγκριτική απεικόνιση των μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης για τα έτη 2010-2017. Έντονες βροχοπτώσεις παρατηρούνται κατά τους χειμερινούς μήνες, γενικά της τάξης των 50-100mm μηνιαίως, με τιμές που φτάνουν τα 180mm τον Ιανουάριο και τον Δεκέμβριο του 2012. Τον Ιούλιο και Αύγουστο ανεξαρτήτως έτους, η βροχόπτωση είναι μηδενική.

Πίνακας 2.2. Μηνιαία βροχόπτωση στη Λεμεσό για το διάστημα 2010-2017. Πηγή : (Τμήμα Μετεωρολογίας, 2018).

Μετεωρολογικός Σταθμός: Λεμεσός (Δημοτικός Κήπος)								
Βροχόπτωση (mm)								
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Ιανουάριος	125.6	142.2	181.7	34.7	33.2	180.9	69.2	95.7
Φεβρουάριος	73.6	62.9	100.9	33.7	24.1	74.7	30.8	14.2
Μάρτιος	8.0	44.9	21.4	5.4	13.9	63.7	27.9	56.5
Απρίλιος	6.4	11.4	13.3	46.2	4.5	10.6	30.1	10.3
Μάιος	1.6	3.4	17.3	4.7	43.0	0.3	12.8	1.6
Ιούνιος	0.0	0.0	0.0	0.0	5.6	0.0	0.0	0.0
Ιούλιος	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Αύγουστος	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
Σεπτέμβριος	0.0	3.5	0.0	0.6	13.4	0.0	1.8	0.0
Οκτώβριος	4.6	18.1	49.8	17.0	22.3	30.4	4.2	35.9
Νοέμβριος	0.0	51.6	60.5	14.0	47.9	0.8	29.0	67.0
Δεκέμβριος	98.9	97.3	181.7	38.0	88.3	26.9	169.2	27.1

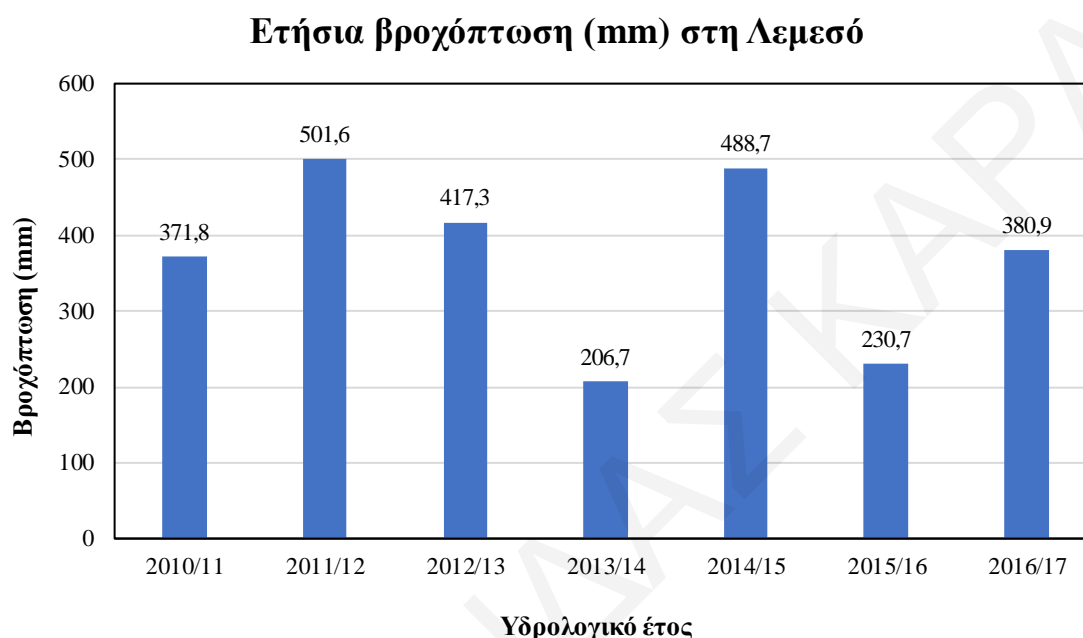
Συγκριτική μηνιαία βροχόπτωση (mm) τα έτη 2010-2017



Σχήμα 2.2. Συγκριτική απεικόνιση της μηνιαίας βροχόπτωσης στη Λεμεσό για το χρονικό διάστημα 2010-2017. Πηγή: (Τμήμα Μετεωρολογίας, 2018).

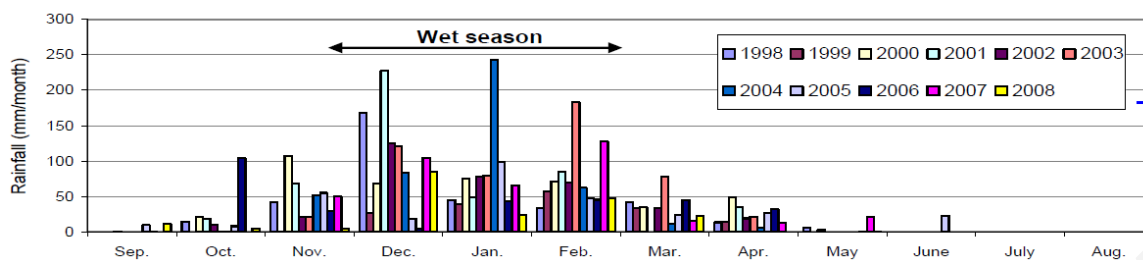
Η συνολική βροχόπτωση ανά έτος για το διάστημα 2010-2017 παρουσιάζεται στο γράφημα του Σχήματος 2.3 που ακολουθεί. Η μέγιστη ετήσια τιμή βροχόπτωσης (502mm) καταγράφηκε το υδρολογικό έτος (χρονικό διάστημα από Οκτώβριο έως και Σεπτέμβριο)

2011/12 και η ελάχιστη το υδρολογικό έτος 2013/14 (207mm). Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, η «έναρξη» της κατολίσθησης στην περιοχή «Λίμνες» Πισσουρίου συμπίπτει με το εξαιρετικά βροχερό υδρολογικό έτος 2011/12 (βροχόπτωση 32% περισσότερη από την κανονική). Συνεπώς είναι εύλογο να υποθεθεί ότι η κύρια αιτία εκδήλωσης του φαινομένου έχει να κάνει με το υπόγειο νερό.

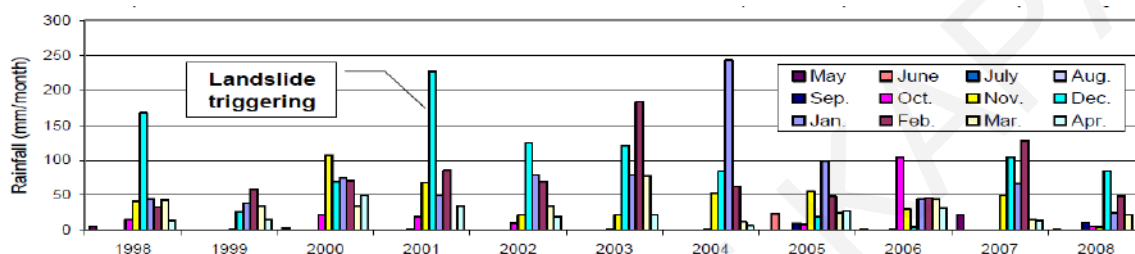


Σχήμα 2.3. Στοιχεία ετήσιας βροχόπτωσης για την επαρχία Λεμεσού το χρονικό διάστημα 2010-2017. Πηγή: (Τμήμα Μετεωρολογίας, 2018).

Σε ότι αφορά την έναρξη των μετακινήσεων, η κατολίσθηση στη περιοχή Λίμνες παρουσιάζει ομοιότητες με την παλαιότερη κατολίσθηση στην οδό Ανεξαρτησίας λίγο βορειότερα. Με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα που παραθέτουν οι Alexandris et al. (2017) και αφορούν το διάστημα 1998-2008 (Σχήματα 2.4 και 2.5), ο ετήσιος μέσος όρος βροχόπτωσης στην περιοχή κυμαίνονταν από 300 έως 400mm. Η χρονοσειρά των μηνιαίων βροχοπτώσεων στην επαρχία Λεμεσού, κατά την περίοδο 1998-2008, παρουσιάζεται στα γραφήματα των σχημάτων 2.4 και 2.5. Η έναρξη της κατολίσθησης στην οδό Ανεξαρτησίας εκδηλώθηκε το χειμώνα του υδρολογικού έτους 2001/2002 στο οποίο το συνολικό ύψος βροχόπτωσης ήταν 490mm, δηλαδή σε έτος πολυομβρίας με 30% μεγαλύτερη βροχόπτωση από την κανονική, ποσοστό παρόμοιο με του 2011/2012. Μάλιστα, το Δεκέμβριο του 2001 το ύψος βροχόπτωσης ήταν 230mm, δηλαδή σχεδόν η μισή βροχόπτωση του υδρολογικού έτους συνέβη εντός του Δεκεμβρίου, δίνοντας το έναυσμα για την έναρξη των εδαφικών μετακινήσεων.



Σχήμα 2.4. Εποχιακή κατανομή βροχόπτωσης. Στοιχεία από τον μετεωρολογικό σταθμό Πισσουρίου (1998 - 2008). Πηγή: (Alexandris et al., 2017).



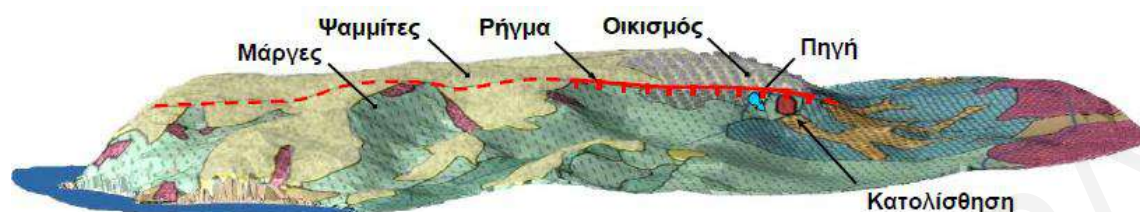
Σχήμα 2.5. Ετήσια κατανομή μηνιαίας βροχόπτωσης. Στοιχεία από τον μετεωρολογικό σταθμό Πισσουρίου (1998 - 2008). Πηγή: (Alexandris et al., 2017).

2.3. Υδρογεωλογικά στοιχεία

Στην περιοχή του Πισσουρίου υπάρχει σχετικά ρηχός σταθερός υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας, ο οποίος τροφοδοτείται κυρίως από τα όμβρια ύδατα, τις διαρροές του δικτύου ύδρευσης, τις αρδεύσεις και τα αστικά λύματα. Μέχρι στιγμής στο Πισσούρι δεν υπάρχει αποχετευτικό σύστημα και τα νερά των λυμάτων (ή ακόμη και τα λύματα αυτά καθαυτά) διοχετεύονται σε απορροφητικούς λάκκους (Νικολαΐδης & Συνεργάτες, 2010) και με το πέρασμα του χρόνου τροφοδοτούν τον υδροφόρο ορίζοντα.

Στο λόφο της περιοχής του παλαιού οικισμού, ο υδροφόρος αναπτύσσεται εντός της ψαμμιτικής στρώσης, η οποία αποτελεί και την επιφανειακή στρώση του εδάφους. Λόγω της διαπερατότητας της ψαμμιτικής στρώσης τα ύδατα κινούνται από την κορυφή του λόφου του χωριού προς χαμηλότερα υψόμετρα και αναβλύζουν από σημεία των φυσικών πρηνών στην διεπιφάνεια ψαμμιτών - μαργών. Το Σχήμα 2.6 των Alexandris et al. (2017) δείχνει τρισδιάστατη απεικόνιση του λόφου όπου φαίνεται η θέση της πηγής κοντά στην κατολίσθηση της οδού Ανεξαρτησίας, ενώ παράλληλα αναδεικνύει την παρουσία ενός ρήγματος διεύθυνσης BBA-NNΔ, το οποίο διατρέχει την ανατολική παρειά του οικισμού του Πισσουρίου παράλληλα με τον άξονα του λόφου. Στην παρουσία του ρήγματος

αποδίδεται η απότομη μορφολογία της ανατολικής κλιτύος και η εμφάνιση των πηγών στα χαμηλότερα σημεία της.



Σχήμα 2.6. Τρισδιάστατη απεικόνιση του λόφου του Πισσουρίου. Πηγή: (Alexandris et al., 2017).

Κατά τις προηγούμενες δεκαετίες, οι κάτοικοι του Πισσουρίου εκμεταλλεύονταν τον υδροφόρο αντλώντας νερό για την ικανοποίηση αναγκών κυρίως ύδρευσης αλλά και άρδευσης. Μετά την κατασκευή δικτύου ύδρευσης, η άντληση νερού από τον υδροφόρο περιορίστηκε. Αντιθέτως αυξήθηκε η ποσότητα των υδάτων που καταλήγουν στον υδροφόρο λόγω της αστικής χρήσης, γεγονός το οποίο σύμφωνα με τους Alexandris et al. (2017) επιβεβαιώνεται μέσω χημικών αναλύσεων δειγμάτων νερού από την περιοχή της κατολίσθησης της οδού Ανεξαρτησίας που έδειξαν ίχνη απορρυπαντικών. Οι Νικολαΐδης & Συνεργάτες (2010) αναφέρουν ότι το γενικό δίκτυο αποστράγγισης της περιοχής Πισσουρίου ακολουθεί κατά το πλείστον μια κατεύθυνση βορρά-νότου με τη μικρή λεκάνη απορροής του χειμάρρου Πισσουρίου να εκβάλλει προς τη θάλασσα μόνο σε περίπτωση μεγάλων βροχοπτώσεων. Στην περιοχή δεν υπάρχει σημαντική επιφανειακή απορροή.

Στο πλαίσιο της μελέτης των εδαφικών μετακινήσεων στην περιοχή Λίμνες από το Κράτος, διενεργήθηκαν γεωτρήσεις σε πλήθος σημείων της περιοχής των Λιμνών υπό την αιγίδα του Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης. Οι γεωτρήσεις έδειξαν ότι η στάθμη του υδροφόρου στις αρχές Οκτωβρίου 2015 κυμαίνονταν μεταξύ 5.7m και 14.4m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Το υψόμετρο του εδάφους στα σημεία των γεωτρήσεων ήταν μεταξύ 159m και 218m. Οι θέσεις των γεωτρήσεων παρουσιάζονται στον χάρτη του Σχήματος 2.7, ενώ τα αποτελέσματα των μετρήσεων τους παρατίθενται στον Πίνακα 2.3. Δεδομένου ότι οι μετρήσεις έγιναν στο τέλος της ξηράς περιόδου (αρχές Οκτωβρίου), είναι εύλογο ότι η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα κατά τους χειμερινούς μήνες θα είναι υψηλότερη (ίσως κατά κάποια μέτρα, ειδικά στην περίπτωση ετών πολυομβρίας).



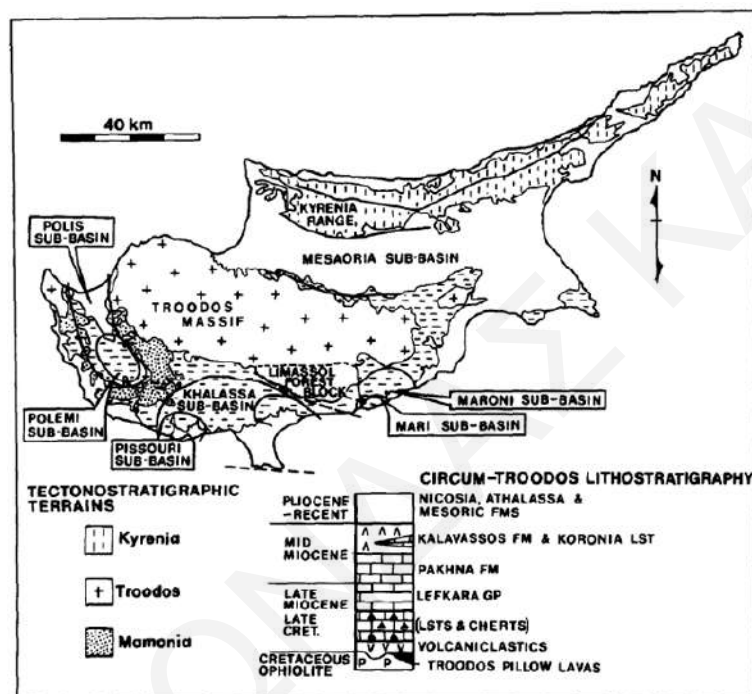
Σχήμα 2.7. Χάρτης θέσεων γεωτρήσεων στην περιοχή Λίμνες της κοινότητας Πισσουρίου.

Πίνακας 2.3. Μετρήσεις στάθμης νερού στις αρχές Οκτωβρίου 2015 σε γεωτρήσεις που διενεργήθηκαν στην περιοχή Λίμνες. Πηγή : Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης.

Γεώτρηση	Βάθος στάθμης νερού (m)	Υψόμετρο επιφάνειας εδάφους (m)
Γ1	5.97	204.5
Γ2	5.93	204.5
Γ3	6.20	204.5
Γ4	7.86	207.0
NBH1	6.63	205.0
NBH2	8.24	202.0
NBH3	8.41	207.0
NBH4	8.17	198.5
NBH5	9.95	195.0
NBH6	8.42	188.0
NBH7	6.80	185.0
NBH8	12.08	218.0
NBH9	5.72	189.0
NBH10	11.75	198.0
NBH11	14.40	159.0
NBH12	8.95	188.0

2.4. Γεωλογικά στοιχεία

Η λεκάνη του Πισσουρίου θεωρείται μια ιζηματογενής υπολεκάνη της Νεογενούς περιόδου και η ανάπτυξη της ξεκίνησε κατά το Πρώιμο και Ύστερο Μειόκαινο (Hearn et al., 2018). Η υπολεκάνη του Πισσουρίου εντοπίζεται στο νοτιοδυτικό τμήμα της λεκάνης της Άλασσας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8, το οποίο παρουσιάζει τις καταγεγραμμένες ιζηματογενείς λεκάνες του νησιού.

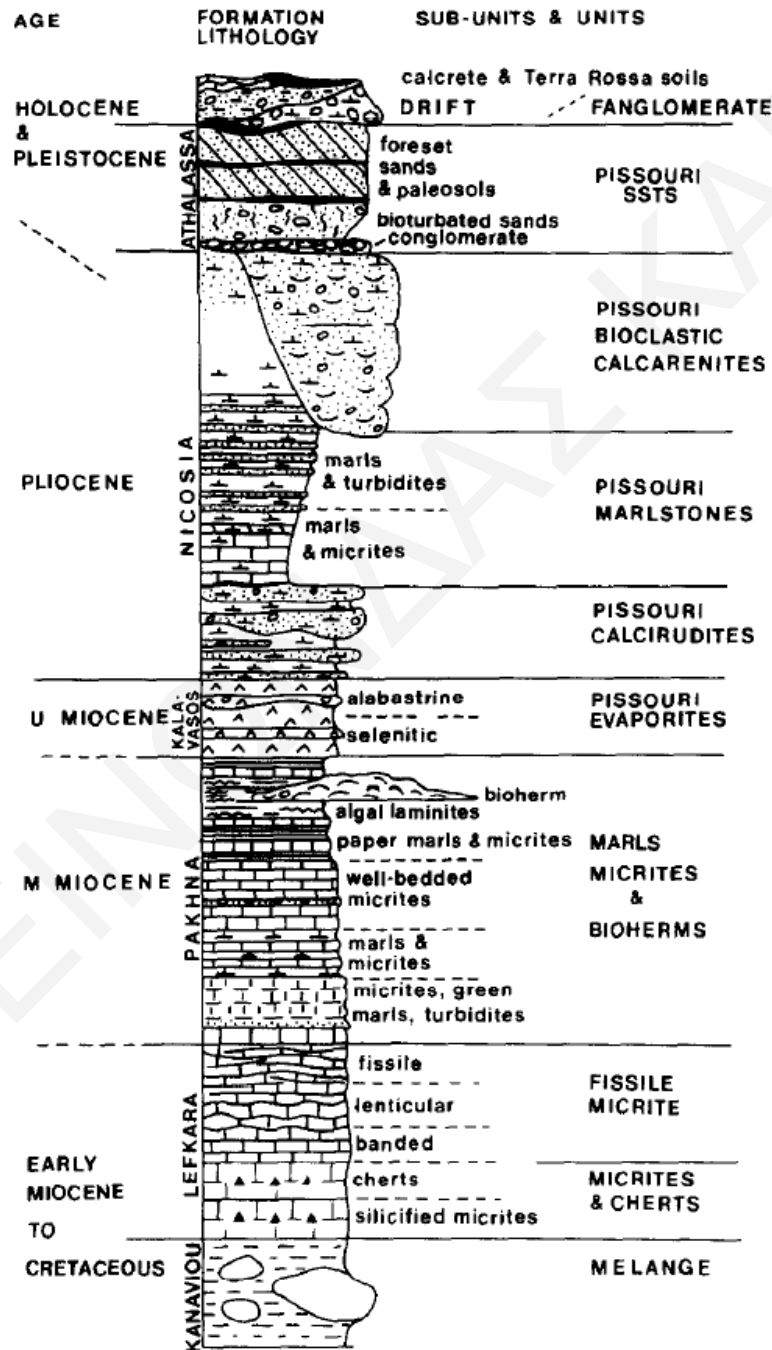


Σχήμα 2.8. Χάρτης της Κύπρου που παρουσιάζει τις ιζηματογενείς λεκάνες του νησιού. Πηγή: (Stow et al., 1995).

Τα όρια της λεκάνης του Πισσουρίου επισημαίνονται από την μετάβαση από τα αδιαφοροποίητα ιζήματα των Λευκάρων στα σημαντικά διαφοροποιημένα ιζήματα του σχηματισμού της Πάχνας. Η έκταση της λαμβάνοντας ως κέντρο το χωριό του Πισσουρίου εκτιμάται στα 23km από το ανατολικότερο προς το δυτικότερο τμήμα της και στα 12km χιλιόμετρα από το βορειότερο στο νοτιότερο τμήμα της (Stow et al., 1995).

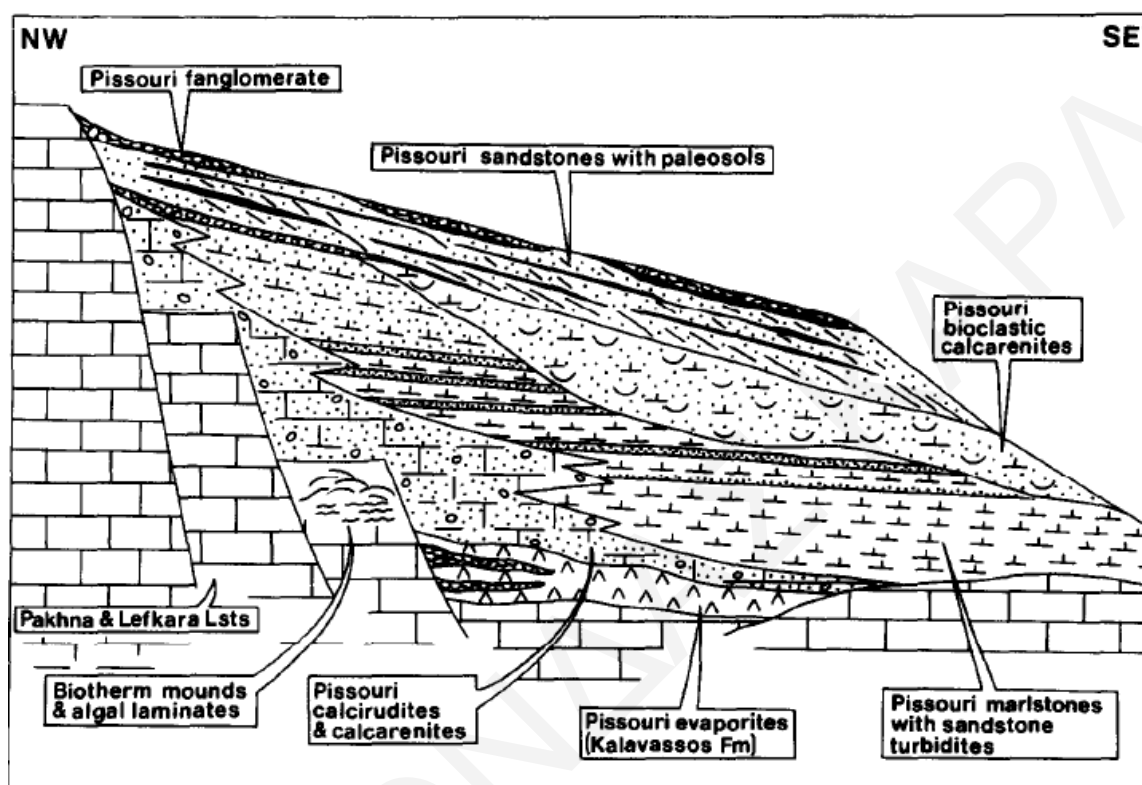
Οι Stow et al. (1995) στα πλαίσια της μελέτης τους για την λεκάνη του Πισσουρίου έκαναν γεωλογική αποτύπωση της ευρύτερης περιοχής και κατέστρωσαν τη λιθοστρωματογραφική στήλη του Σχήματος 2.9. Τα κύρια γεωλογικά συστατικά της λεκάνης του Πισσουρίου συνιστούν: 1) οι μάργες και μικρίτες του Μέσου Μειόκαινου τα οποία ανήκουν στο σχηματισμό Πάχνας, 2) οι εβαπορίτες (γύψοι) του Ύστερου

Μειόκαινου του σχηματισμού Καλάβασου, 3) οι μάργες της Πλειοκαινικής περιόδου που ανήκουν στον σχηματισμό Λευκωσίας, καθώς και 4) υπερκείμενοι ασβεστιτικοί ψαμμίτες (ασβεσταρενίτες) και δελταϊκά ριπίδια τύπου Gilbert (Gilbert-type delta foresets) του Ύστερου Πλειόκαινου - Πρώιμου Πλειστόκαινου.



Σχήμα 2.9. Λιθοστρωματογραφική στήλη της λεκάνης του Πισσουρίου. Πηγή: (Stow et al., 1995).

Στο Σχήμα 2.10 (Stow et al., 1995), μέσω της τομής που διατρέχει το Πισσούρι από τα βορειοδυτικά προς τα νοτιοανατολικά παρέχεται η δυνατότητα μιας πιο ολοκληρωμένης εικόνας της στρωμάτωσης των πετρωμάτων στην περιοχή μελέτης, με τα στρώματα να έχουν εν γένει κλίση προς τα νοτιοανατολικά.



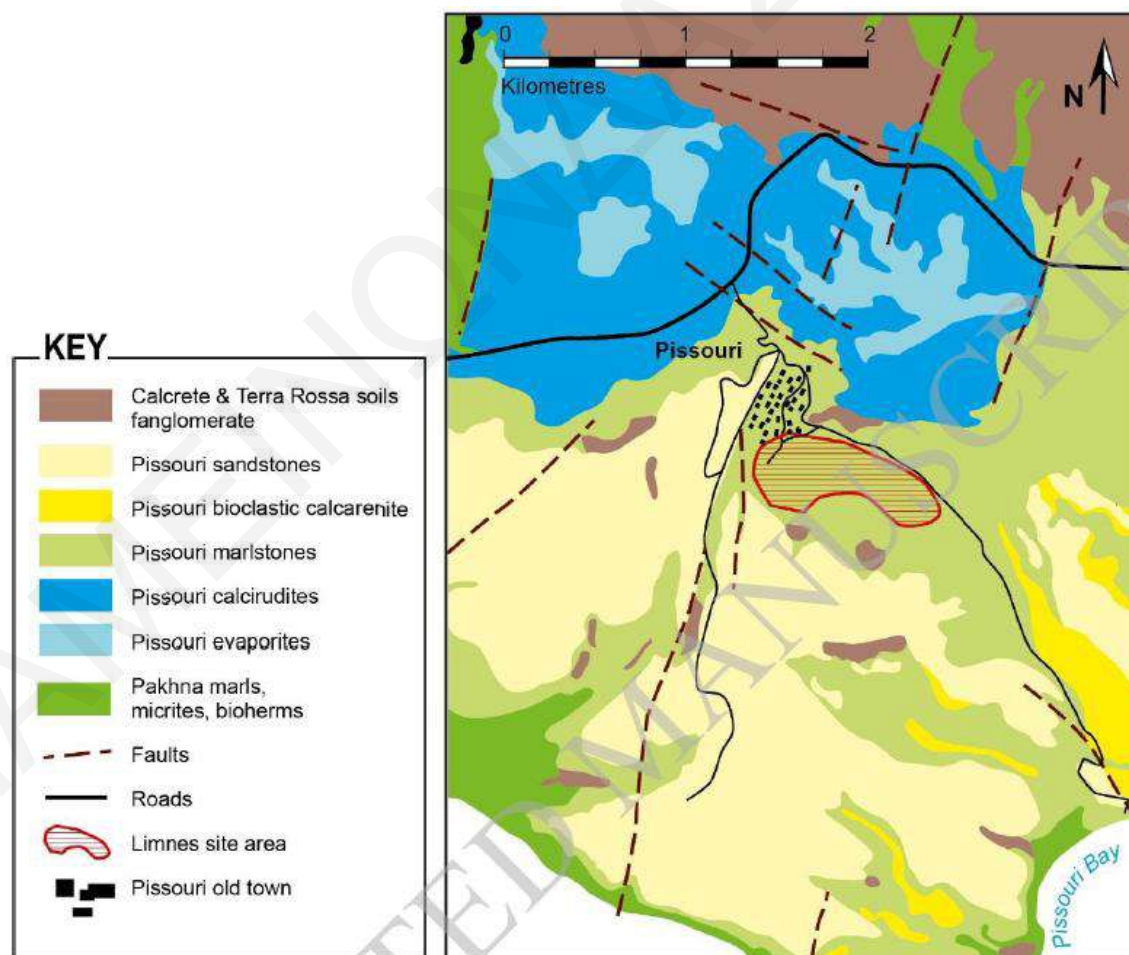
Σχήμα 2.10. Συνθετική τομή από τα βορειοδυτικά προς τα νοτιοανατολικά που διατρέχει το δελταϊκό σύμπλεγμα του Πισσουρίου. Πηγή: (Stow et al., 1995).

Σύμφωνα με τους Alexandris et. al (2017), οι περιοχές του Πισσουρίου που εμφανίζουν μεγαλύτερο υψόμετρο καλύπτονται από ασβεστιτικούς ψαμμίτες οι οποίοι σχηματίστηκαν την Πλειστοκαινική περίοδο. Εντός αυτών των στρωμάτων συναντώνται συχνά παρεμβολές αργιλικών υλικών και κροκαλοπαγών, τα οποία καλύπτονται σε αρκετές περιοχές από ένα αμμώδες στρώμα αποσαθρωμένου ψαμμίτη. Υποκείμενοι αυτών είναι οι βιοκλαστικοί ασβεσταρενίτες και οι μάργες του σχηματισμού της Λευκωσίας. Εντός των μαργών, εντοπίζονται σποραδικά αμμώδη ενδιάμεσα στρώματα. Όπου ο μαργαϊκός σχηματισμός εμφανίζεται επιφανειακά, η ανώτερη ζώνη του είναι αποσαθρωμένη και έντονα διαρρηγμένη και ο σχηματισμός έχει τη μορφή καστανού έως καστανέρυθρου μαλακού βράχου. Σε θέσεις ακόμα εντονότερης αποσάθρωσης, η ανώτερη αυτή ζώνη,

αποσυντίθεται σε έναν εδαφοποιημένο ορίζοντα εντός του οποίου παρατηρούνται βραχώδη τεμάχια.

Εστιάζοντας στην περιοχή της κοινότητας Πισσουρίου, οι Stow et al. (1995) αναφέρουν τη μάργα Λευκωσίας ως το κυρίαρχο υλικό στις πλαγιές της περιοχής, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται από τον γεωλογικό χάρτη του Σχήματος 2.11. Συγκεκριμένα, θεωρούν ότι η ενότητα της μάργας (marl unit) αποτελείται από τρία μέρη μέγιστου συνολικού πάχους 120 μέτρων, τα οποία παρουσιάζουν την εξής σύνθεση:

- i) Το χαμηλότερο τμήμα, το οποίο έχει μέγιστο πάχος 20m και περιλαμβάνει γκριζωπή-λευκή μάργα και μικριτικούς ασβεστόλιθους, οι οποίοι παρεμβάλλονται.
- ii) Το μεσαίο τμήμα, που έχει σχεδόν σταθερό πάχος 25m-30m.
- iii) Το ανώτερο τμήμα που έχει πάχος 50m-80m και αποτελείται από μέσου και μεγάλου πάχους πάγκους στρωματοποιημένου ιλύόλιθου και ψαμμίτες εναλλασσόμενους με πάγκους μάργας σε περίπου ίσες αναλογίες.



Σχήμα 2.11. Γεωλογικός χάρτης πετρωμάτων της ευρύτερη περιοχής μελέτης. Με κόκκινο χρώμα σκιαγραφείται η περιοχή των Λιμνών. Πηγή: (Hearn et al., 2018).

Οι Hearn et al. (2018) αναφέρουν ότι οι στρώσεις της μάργας είναι υπό-οριζόντιες με μια μικρή γωνία κλίσης. Αυτή η μικρή κλίση έχει κατεύθυνση προς ανατολικά-νοτιοανατολικά (Stow et al. 1995, Hearn et al. 2018). Σε ορισμένα σημεία, η διαστρωμάτωση έχει πιο μεγάλη κλίση και παρουσιάζει ρηγματώσεις, ενώ παρατηρούνται λεπτές ενστρώσεις ψαμμίτη και ιλυόλιθου. Η μάργα επικαλύπτεται από λεπτά στρώματα ιλυόλιθου και ψαμμίτη, τα οποία με τη σειρά τους επικαλύπτονται από κροκαλοπαγές το οποίο σχηματίζει το πλάτωμα σε ύψος περίπου 260 μέτρων πάνω από τον παλαιό οικισμό του Πισσουρίου.

Της μάργας υπόκειται στρώμα ασβεστορρουδίτη το πάχος του οποίου μεταβάλλεται ακανόνιστα φθάνοντας έως τα 25m (Stow et al., 1995). Σύμφωνα με τους Stow et al. (1995), η μάργα του σχηματισμού Λευκωσίας επικάθεται σε συμφωνία (conformity) με το στρώμα ασβεστορρουδίτη. Στα τελευταία μέτρα του στρώματος ασβεστορρουδίτη, όπου γίνεται η μετάβαση στους γύψους του Σχηματισμού Καλαβασού, περιλαμβάνονται ενδιαστρώσεις από μάργες και ιλυώδεις μάργες δημιουργώντας μια συγκέντρωση άφθονων μικροαπολιθωμάτων με προέλευση από λιμνοθάλασσα. Στο ανώτερο τμήμα του στρώματος, ο ασβεστορρουδίτης απαντάται μεταξύ λεπτών στρώσεων από ασβεστιτικούς ιλύτες και ασβεσταρενίτες, δίνοντας προοδευτικά τη θέση του σε παχύτερους πάγκους ασβεσταρενίτη και ασβεστορρουδίτη με κάποιες λεπτού πάχους ενδιαστρώσεις μάργας. Οι Stow et al. (1995) αναφέρουν ότι γύψος παρατηρείται σε αρκετά τμήματα της λεκάνης του Πισσουρίου, αλλά η μεγαλύτερη έκταση του σημειώνεται στο κεντρικό και νότιο τμήμα της, με το πάχος να φτάνει ακόμα και τα 40m.

Οι Hearn et al. (2018) μέσω γεωμορφολογικής ανάλυσης κατέληξαν στο συμπέρασμα της ύπαρξης μιας παλαιοκατολίστησης (ηλικίας πιθανότατα Ύστερου Πλειστόκαινου-Πρώιμου Ολόκαινου), στην οποία οφείλεται η αστάθεια που παρατηρείται σήμερα στην πλαγιά του Πισσουρίου. Σύμφωνα με τους Hearn et al. (2018), η τρέχουσα επιφάνεια ολίστησης εκτιμάται ότι βρίσκεται σε σχετικά μικρό βάθος, εντός της μάργας που είχε αστοχήσει παλαιότερα. Πιθανές αιτίες θεωρούνται η μειωμένη αντοχή της μάργας και ο υψηλός υδροφόρος ορίζοντας.

2.5. Στοιχεία σεισμικότητας

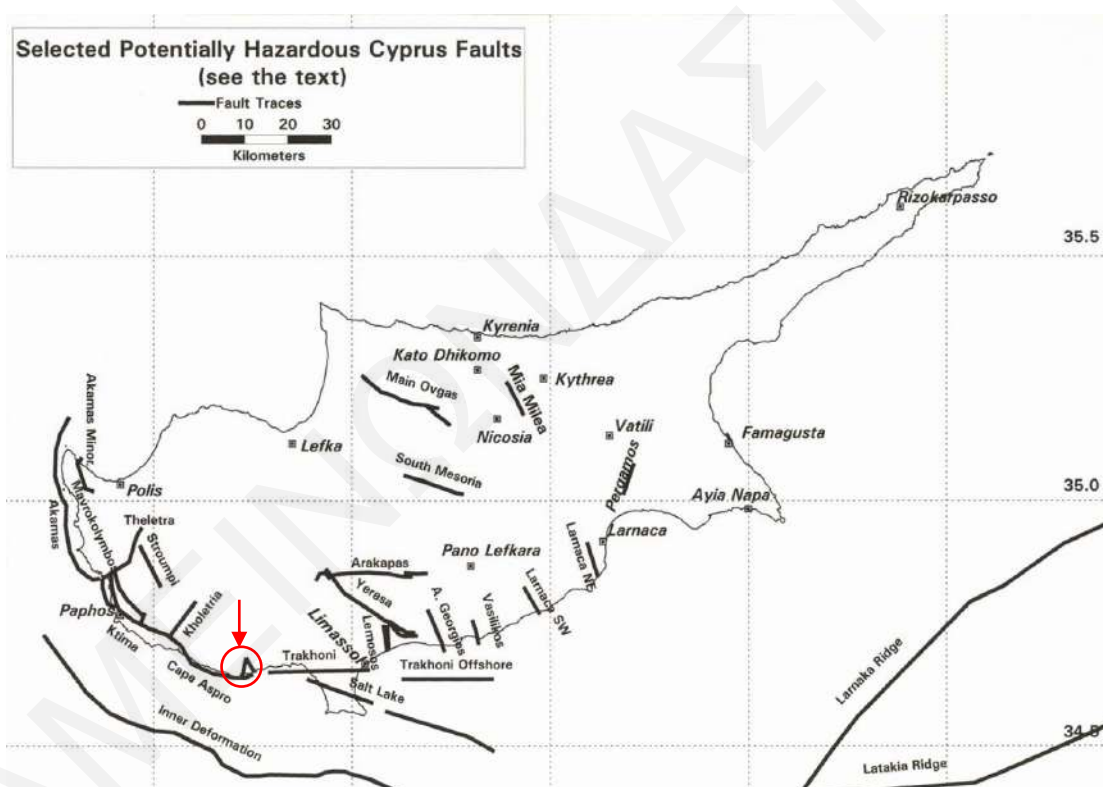
Η Κύπρος και ειδικότερα το νότιο τμήμα της παρουσιάζει αυξημένη σεισμικότητα. Αυτό οφείλεται στην τεκτονική δραστηριότητα που παρατηρείται στη ζώνη επαφής μεταξύ δυο λιθοσφαιρικών πλακών, της Αφρικανικής στα νότια και της Ευρασιατικής στα βόρεια. Η περιοχή του Πισσουρίου, που βρίσκεται στο νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού, εντάσσεται στην σεισμική Ζώνη 3 του χάρτη του Κυπριακού Προσαρτήματος στον Ευρωκώδικα 8-Μέρος 1 (Σχήμα 2.12), όπου η μέγιστη σεισμική επιτάχυνση σε έδαφος κατηγορίας Α (δηλαδή σε βράχο) με πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 χρόνια (περίοδος επαναφοράς 475 έτη) είναι 0.25g.



Σχήμα 2.12. Σεισμικές ζώνες της Κύπρου. Πηγή: (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης, 2004).

Άξια αναφοράς είναι η παρουσία ρηγμάτων στην περιοχή μελέτης. Πολλά από τα ρήγματα που έχουν καταγραφεί παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.11, με τα περισσότερα από αυτά να έχουν BBA-NNΔ κατεύθυνση. Οι Kinnaird & Robertson (2013) περιγράφουν ρήγματα με παρόμοιο προσανατολισμό να βυθίζονται απότομα, με κλίση 50-70°, προς τα δυτικά.

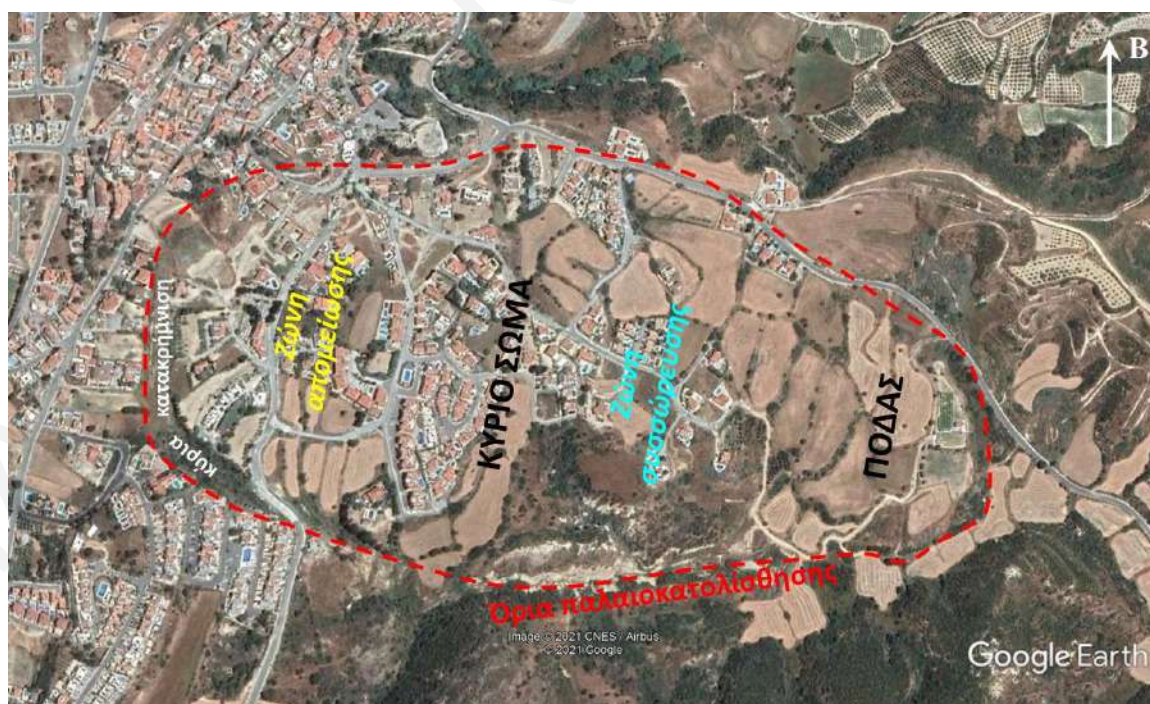
Επιπρόσθετα αναφέρουν δυο ρήγματα στα ανατολικά του Πισσουρίου, τα οποία εκδηλώνονται με γκρεμούς και έχουν διεύθυνση σχεδόν κάθετη προς την ακτή. Επίσης, υπάρχουν εμφανή ρήγματα κατά μήκος του αυτοκινητόδρομου Πάφου - Λεμεσού κοντά στην είσοδο για το Πισσούρι. Από τα προαναφερθέντα ρήγματα, μόνο δυο ενδέχεται να είναι σεισμικώς ενεργά, όπως φαίνεται στον χάρτη τους Σχήματος 2.13 (ρήγματα εντός κόκκινου κύκλου) και τα οποία βρίσκονται μόλις 3km με 4km ανατολικά από το χωριό Πισσούρι. Ο συγκεκριμένος χάρτης, ο οποίος συντάχθηκε στα πλαίσια της Μικροζωνικής μελέτης της Λευκωσίας δείχνει τα ρήγματα τα οποία εκτιμάται ότι έχουν εμφανίσει μετακινήσεις εντός του Τεταρτογενούς (από 2.5εκ. χρόνια πριν μέχρι σήμερα) και άρα είναι δυνητικώς ενεργά ή εν υπνώσει.



Σχήμα 2.13. Χάρτης ρηγμάτων της Κύπρου που εκτιμάται ότι έχουν δώσει μετακινήσεις κατά το Τεταρτογενές. Πηγή: (Algermissen & Rogers, 2004).

2.6. Αναγνώριση γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών

Η περιοχή που παρατηρούνται μετακινήσεις από το 2011/12 εμφανίζει ξεκάθαρα χαρακτηριστικά μιας παλαιοκατολίστησης, τα οποία μπορούν εύκολα να διαπιστωθούν με επιτόπια επίσκεψη και με εξέταση δορυφορικών φωτογραφιών ή αεροφωτογραφιών. Το τοπίο κυριαρχείται από ένα πρηνές με απότομη κλίση (γωνία κλίσης 37°) και πεταλοειδή μορφή σε κάτοψη, το οποίο αποτελεί την κύρια κατακρήμνιση της παλαιοκατολίστησης (Σχήμα 2.14). Επίσης εμφανής είναι η ύπαρξη του πόδα στη βάση της κλιτύς, όπου στην απόληξή του (με σαφή κυρτή γεωμετρία στο χάρτη) το έδαφος εμφανίζει επίσης διακριτά μεγάλη κλίση (20° - 25°). Η κλίση της επιφάνειας του εδάφους μεταξύ αυτών των δυο ακραίων περιοχών είναι σχετική μικρή, μόλις 7° , με αζιμούθιο κλίσης (κατεύθυνση) $B102^\circ$ στο κύριο σώμα και $B107^\circ$ αν συμπεριληφθεί και ο πόδας. Η παλαιοκατολίστηση καταλαμβάνει στον χάρτη μια ελλειψοειδή (οβάλ) περιοχή, της οποίας ο διαμήκης άξονας έχει διεύθυνση με απόκλιση μόλις λίγων μοιρών ως προς τον άξονα ανατολής-δύσης. Το συνολικό μήκος της παλαιοκατολίστησης είναι 1140m και το μήκος της ολισθαίνουσας μάζας 1095m. Πλευρικά η παλαιοκατολίστηση οριοθετείται από ένα ρέμα στα νότια, ενώ το βόρειο όριο φαίνεται να συμπίπτει προσεγγιστικά με τη χάραξη του δρόμου που συνδέει το κέντρο της κοινότητας με τον κόλπο του Πισσουρίου.



Σχήμα 2.14. Δορυφορική φωτογραφία της περιοχής μελέτης με τα κύρια γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της παλαιοκατολίστησης.

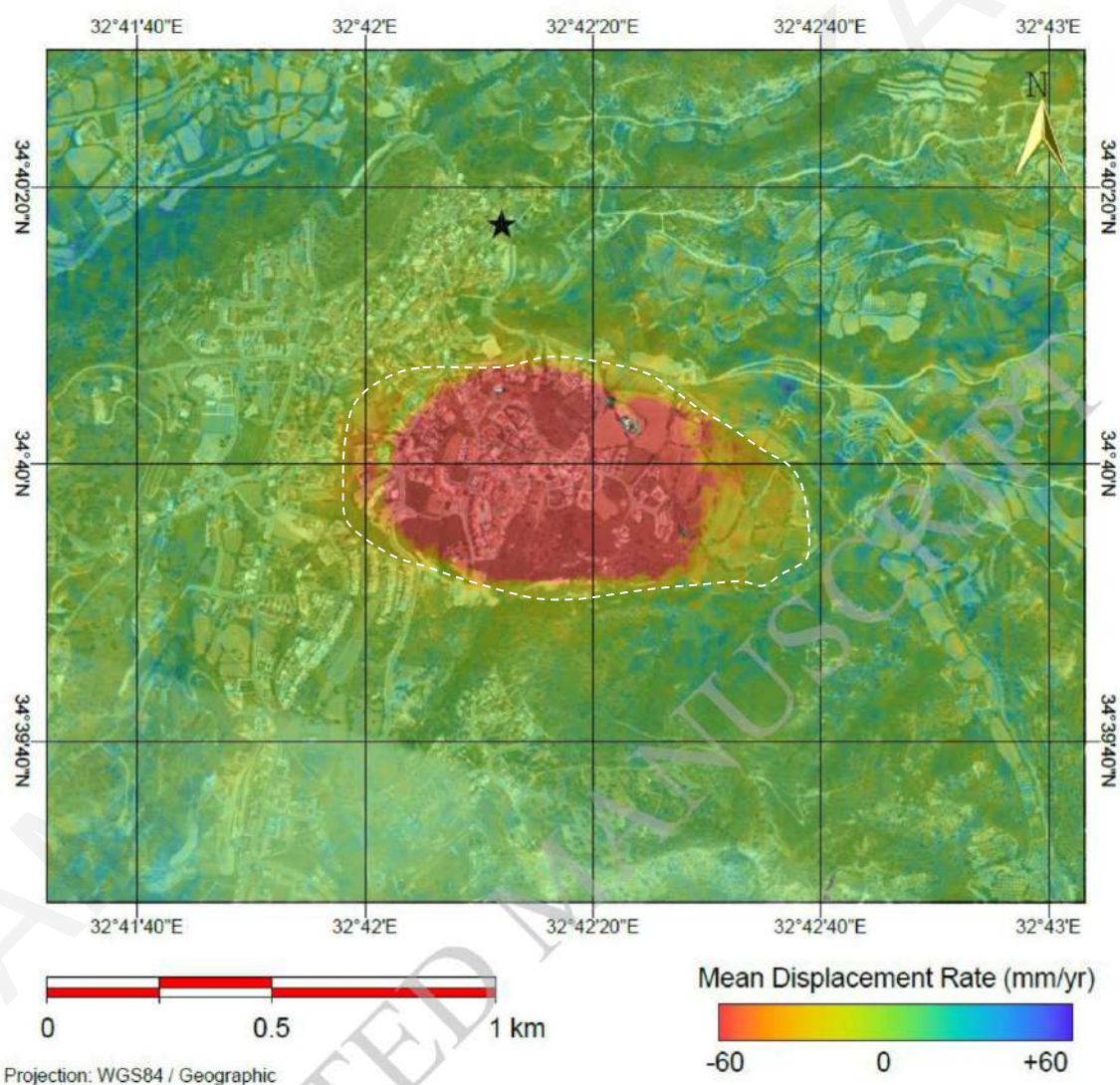
Το βόρειο άκρο είναι λιγότερο προφανές βάσει γεωμορφολογίας σε σύγκριση με το νότιο, αλλά καθίσταται σαφές από την κατανομή των ζημιών σε σπίτια και ρωγμών επί του εδάφους. Το πλάτος της παλαιοκατολίσθησης είναι περίπου 580m. Η έκταση της παλαιοκατολίσθησης σε οριζοντιογραφία είναι σχεδόν 460 στρέμματα, με σύγχρονη οικιστική ανάπτυξη σε όλη την έκταση του κυρίως σώματος. Η οικιστική ανάπτυξη είναι πιο έντονη στη ζώνη απομείωσης από ότι στη ζώνη συσσώρευσής (Σχήμα 2.14). Επί του ποδός έχει κατασκευαστεί μόνο μια κατοικία.

Με βάση τη μορφολογία, η παλαιοκατολίσθηση σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση McCalpin (1984) μπορεί να καταταχθεί μεταξύ νέας (young) και ώριμης (mature). Το χαρακτηριστικό που την κατατάσσει σε νέα είναι η σχετικά αδιάβρωτη κύρια κατακρήμνιση. Επίσης, το τοπωνύμιο Λίμνες, το οποίο αφορά σε ένα τμήμα (βόρειο τμήμα της ζώνης του κυρίου σώματος), ενδέχεται να έχει προκύψει από το ότι σε ιστορικούς χρόνους συγκεντρωνόταν εκεί (κατά τόπους και παροδικά) νερό της βροχής (ponding), που είναι επίσης χαρακτηριστικό πρόσφατων παλαιοκατολισθήσεων. Τα χαρακτηριστικά που την κατατάσσουν σε ώριμη παλαιοκατολίσθηση είναι η σχεδόν εξάλειψη των ενδιάμεσων (δευτερευουσών) κατακρημνίσεων και η δημιουργία ρέματος στο νότιο πλευρικό όριο. Σύμφωνα με τα ηλικιακά όρια που έθεσε ο McCalpin (1984), η παλαιοκατολίσθηση σταμάτησε να είναι ενεργή γύρω στα 2000 με 7000 χρόνια πριν. Εντούτοις, λαμβάνοντας υπόψη ότι αυτά τα χρονικά όρια έχουν προκύψει για μια περιοχή με πολύ περισσότερη ετήσια βροχόπτωση (και άρα πιο έντονη διάβρωση των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών) από ότι το Πισσούρι, ενδεχομένως η παλαιοκατολίσθηση στην περιοχή Λίμνες να σταμάτησε να κινείται 5000 με 20000 χρόνια πριν, δηλαδή σε προϊστορικούς χρόνους. Με βάση τη γεωμετρία της κύριας κατακρήμνισης, η συνολική οριζόντια μετατόπιση που παρήγαγε η παλαιοκατολίσθηση από την έναρξη της μέχρι τη λήξη της πριν χιλιάδες χρόνια είναι περίπου 30m-40m.

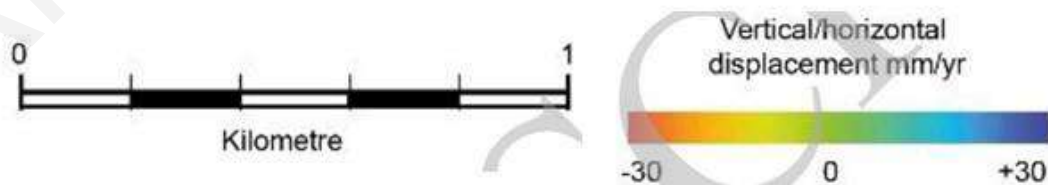
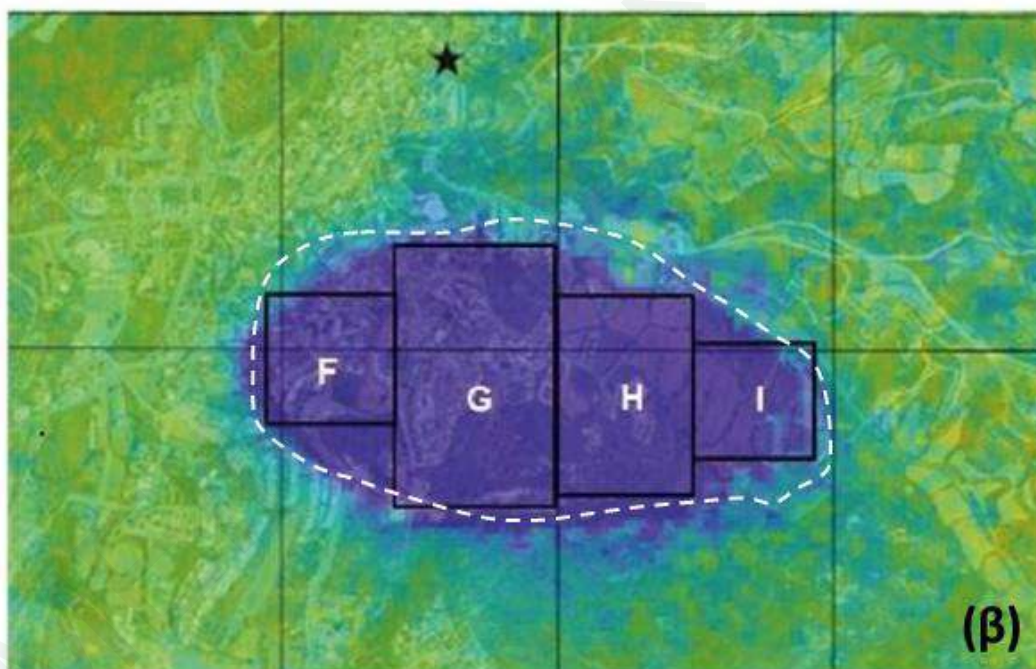
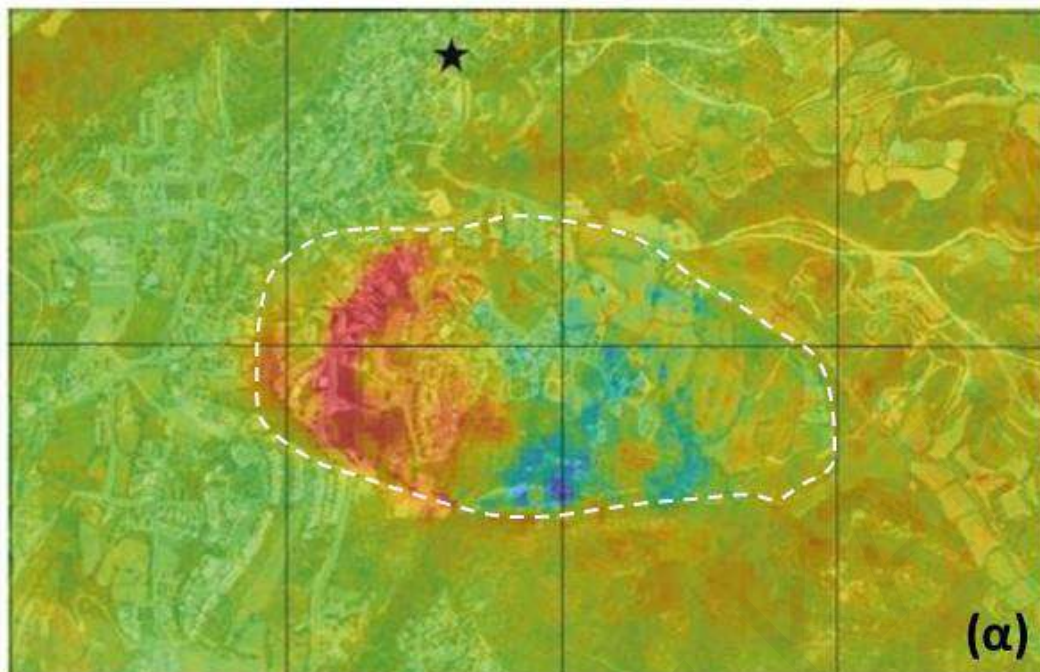
2.7. Δορυφορικές μετρήσεις μετακινήσεων

Οι Hearn et al. (2018) πραγματοποίησαν υπολογισμούς μετακινήσεων στην περιοχή Λίμνες βάσει δορυφορικών παρατηρήσεων με την μέθοδο InSAR. Στο Σχήμα 2.15 φαίνεται ο ρυθμός μετακινήσεων για την περίοδο 2014-2017. Ο μέσος ρυθμός είναι 6cm/έτος στο μεγαλύτερο μέρος της έκτασης που καταλαμβάνει η παλαιοκατολίσθηση, ενώ στην περιοχή του ποδός ο ρυθμός είναι περίπου ο μισός (2.5cm-3cm ανά έτος). Στο

Σχήμα 2.16 φαίνονται οι κατανομές των δυο συνιστωσών μετακινήσεων, η κατακόρυφη (Σχήμα 2.16α) και η οριζόντια (Σχήμα 2.16β), για την περίοδο 2014-2017. Παρατηρούμε ότι η κατακόρυφη μετατόπιση έχει αρνητικές τιμές (-1.5cm με -3cm το χρόνο) στο δυτικό τμήμα της περιοχής της παλαιοκατολίσθησης, αποτυπώνοντας μια ζώνη απομείωσης η οποία πρακτικά ταυτίζεται με τη ζώνη απομείωσης της παλαιοκατολίσθησης. Αμέσως ανατολικότερα αυτής της περιοχής οι κατακόρυφες μετακινήσεις είναι κατά τόπους θετικές (1.5cm – 2cm ανά έτος), ενώ στην περιοχή του ποδός της παλαιοκατολίσθησης η κατακόρυφη συνιστώσα είναι μηδενική.



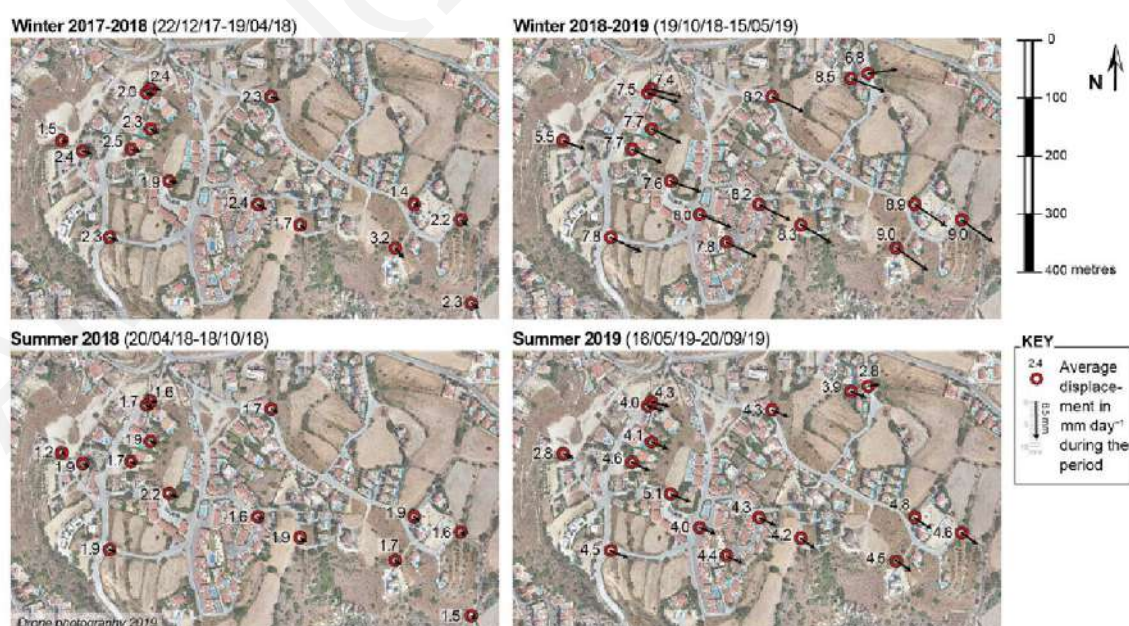
Σχήμα 2.15. Κατανομή μέσου ρυθμού μετακινήσεων την περίοδο 2014-2017 στην περιοχή της κοινότητας Πισσουρίου (Hearn et al., 2018).



Σχήμα 2.16. Κατανομή μέσου ρυθμού α) κατακόρυφης και β) οριζόντιας συνιστώσας μετακινήσεων την περίοδο 2014-2017 στην περιοχή της κοινότητας Πισσουρίου (Hearn et al., 2018).

Από την κατανομή της οριζόντιας συνιστώσας της μετακίνησης (Σχήμα 2.16β), παρατηρούμε ότι η τρέχουσα κατολίσθηση έχει κινητοποιήσει το έδαφος σχεδόν σε όλη την έκταση της παλαιοκατολίσθησης με ρυθμούς τουλάχιστον 3cm/έτος, συμπεριλαμβανομένου του μεγαλύτερου τμήματος του ποδός. Συνεπώς, είναι εύλογο να υποθεθεί ότι η τρέχουσα αστάθεια εδάφους έχει ως επιφάνεια αστοχίας την επιφάνεια ολίσθησης της παλαιοκατολίσθησης και όχι κάποια ρηχότερη και πιο περιορισμένης έκτασης.

Από άποψη ρυθμού μετακινήσεων, η κατολίσθηση βάσει του μέσου ρυθμού μετακινήσεων της περιόδου 2014-2017 χαρακτηρίζεται εξαιρετικά αργή έως πολύ αργή (Πίνακας 1.3). Εντούτοις, τους χειμερινούς μήνες του 2017 παρατηρείται σημαντική αύξηση (υπερδιπλασιασμός) του ρυθμού μετακινήσεων σε 12-16cm/έτος (Hearn et al., 2018). Οι Hearn et al. (2020) αναφέρουν ρυθμούς μετακινήσεων βάσει τοπογραφικών μετρήσεων (Σχήμα 2.17) που κατά μέσο όρο εντός του 2019 είναι της τάξης των 2m/έτος (200cm/έτος), γεγονός που οφείλεται στο ότι κατά το υδρολογικό έτος 2018/19 σημειώθηκε το μεγαλύτερο ύψος βροχόπτωσης την τελευταία τουλάχιστον εκατονταετία. Με βάση αυτές τις πρόσφατες μετρήσεις, οι οποίες είναι επί του κυρίου σώματος της κατολίσθησης, η κατολίσθηση χαρακτηρίζεται ως αργή σύμφωνα με τον Πίνακα 1.3. Σύμφωνα με τις τοπογραφικές μετρήσεις της περιόδου 12/2017-9/2019 των Hearn et al. (2020), η κατεύθυνση της κίνησης είναι προς τα ανατολικά-νοτιοανατολικά (B112°).



Σχήμα 2.17. Μετακινήσεις εδάφους επί του κυρίου σώματος της κατολίσθησης βάσει τοπογραφικών μετρήσεων την περίοδο 12/17-9/19 (Hearn et al., 2020).

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι μετακινήσεις πέραν του στατιστικού θορύβου (της τάξεως 1cm-2cm ανά έτος) δείχνει και η ανάλυση δεδομένων InSAR της περιόδου 2006-2010 (Hearn et al., 2018). Αυτό σημαίνει ότι η παλαιοκατολίσθηση ενδέχεται να είχε επανενεργοποιηθεί νωρίτερα από το χειμώνα 2011/12 και οι μέχρι τότε μετακινήσεις να μην είχαν γίνει αντιληπτές, δεδομένης της σχετικής ανοχής των θεμελιώσεων και των συνήθων ρωγμών που εμφανίζονται σε κτίρια λόγω της εποχιακής διόγκωσης/συρρίκνωσης των διογκώσιμων εδαφών, όπως η μάργα του σχηματισμού Λευκωσίας (Hearn et al., 2018). Η υψηλή βροχόπτωση του χειμώνα 2011/12 επιτάχυνε σημαντικά τον ρυθμό μετακινήσεων, όπως συνέβη και αργότερα (και σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό) με το έτος εξαιρετικής πολυομβρίας 2018/19. Το ύψος βροχόπτωσης του 2011/2012 είναι ελάχιστα μεγαλύτερο από αυτό του έτους 2001/2002. Το γεγονός ότι σημαντικές μετακινήσεις δεν σημειώθηκαν το 2001/2002 στην περιοχή «Λίμνες» πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι η οικιστική ανάπτυξη της ευρύτερης περιοχής δεν είχε φτάσει στα επίπεδα του 2010, όταν και σταμάτησε η κατασκευή νέων κατοικιών (Σχήμα 2.18). Επίσης, από το 1900 έως 1970 υπήρξαν 11 έτη με βροχόπτωση ίση και μεγαλύτερη από του 2011/12, και παρά ταύτα η κατολίσθηση δεν φαίνεται να είχε επανενεργοποιηθεί πριν τις αρχές του 21^{ου} αιώνα. Τα παραπάνω συνηγορούν στο ότι η βασική αιτία της επανενεργοποίησης της παλαιοκατολίσθησης είναι η οικιστική ανάπτυξη της επίμαχης περιοχής (αλλά και ενδεχομένως των ανάντη περιοχών) μέσω της συνεισφοράς των υδάτων από την αστική χρήση (εν τη απουσία κεντρικού αποχετευτικού συστήματος) στην ανύψωση της στάθμης του υπόγειου νερού. Οι έντονες βροχοπτώσεις του 2011/12 αποτελούν απλά το έναυσμα για την ανάπτυξη σημαντικών ρυθμών μετακινήσεων.



B
↑



Σχήμα 2.18. Χρονική εξέλιξη ανάπτυξης γης στην περιοχή Λίμνες. Πηγές: Ορθοφωτογραφίες Τμήματος Κτηματολογίου και Χωρομετρίας και δορυφορικές εικόνες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται συγκέντρωση και επεξεργασία των παραμέτρων που χρειάζονται για τη δημιουργία του υπολογιστικού μοντέλου της κατολίσθησης στην περιοχή Λίμνες Πισσουρίου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 2D. Στο πρώτο μέρος, γίνεται κατάστρωση της γεωλογικής τομής κατά μήκος του κεντρικού άξονα της κατολίσθησης χρησιμοποιώντας χάρτες της ευρύτερης περιοχής του Πισσουρίου και στη συνέχεια γίνεται εκτίμηση του υδροφόρου ορίζοντα από δεδομένα γεωτρήσεων. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στην εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής, και πιο συγκεκριμένα στις τιμές συνοχής και γωνίας τριβής των υλικών του υπεδάφους του Πισσουρίου. Επίσης γίνεται υπολογισμός των κατακόρυφων φορτίων λόγω οικιστικής ανάπτυξης στην περιοχή μελέτης.

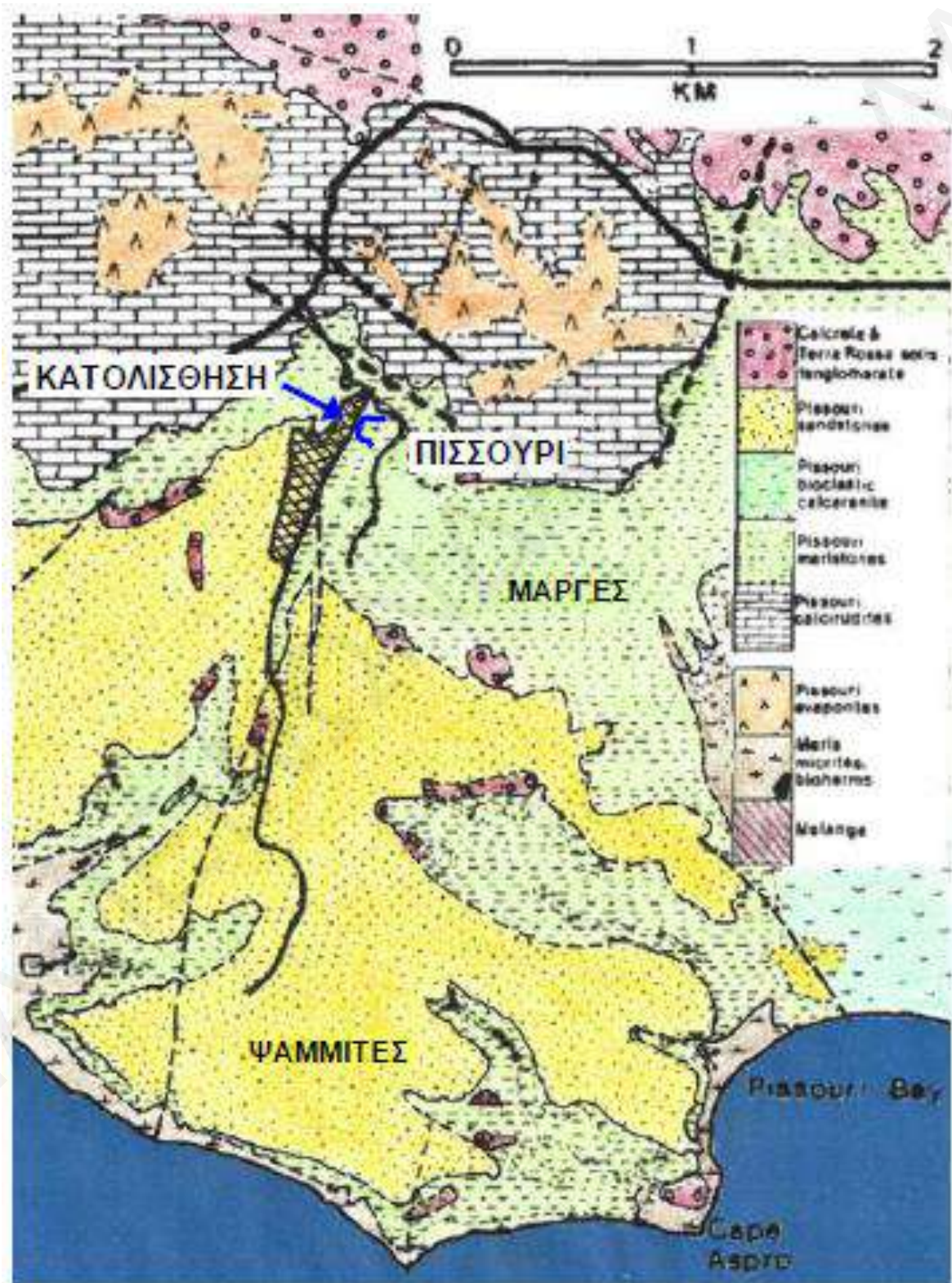
3.1 Στρωματογραφικό μοντέλο περιοχής Λίμνες Πισσουρίου

Η εξέταση της στρωματογραφίας στην περιοχή Λίμνες αποτέλεσε το πρώτο βήμα στη σύνθεση του υπολογιστικού μοντέλου και βασίστηκε στους γεωλογικούς χάρτες που παρατίθενται στα άρθρα των Stow et al. (1995), Alexandris et al. (2017) και Hearn et al. (2018), και οι οποίοι σε συνδυασμό με χάρτες ισοϋψών καμπύλων τοποθετήθηκαν στο πρόγραμμα Google Earth με image overlay, επιδιώκοντας την ελάχιστη δυνατή απόκλιση. Στόχος ήταν η σχεδίαση παρατάξεων (structure contours) των επαφών μεταξύ των διαφορετικών στρωμάτων της περιοχής έτσι ώστε να σχεδιαστεί η κατακόρυφη τομή της ανάλυσης ευστάθειας.

3.1.1 Γεωλογικοί χάρτες περιοχής Πισσουρίου

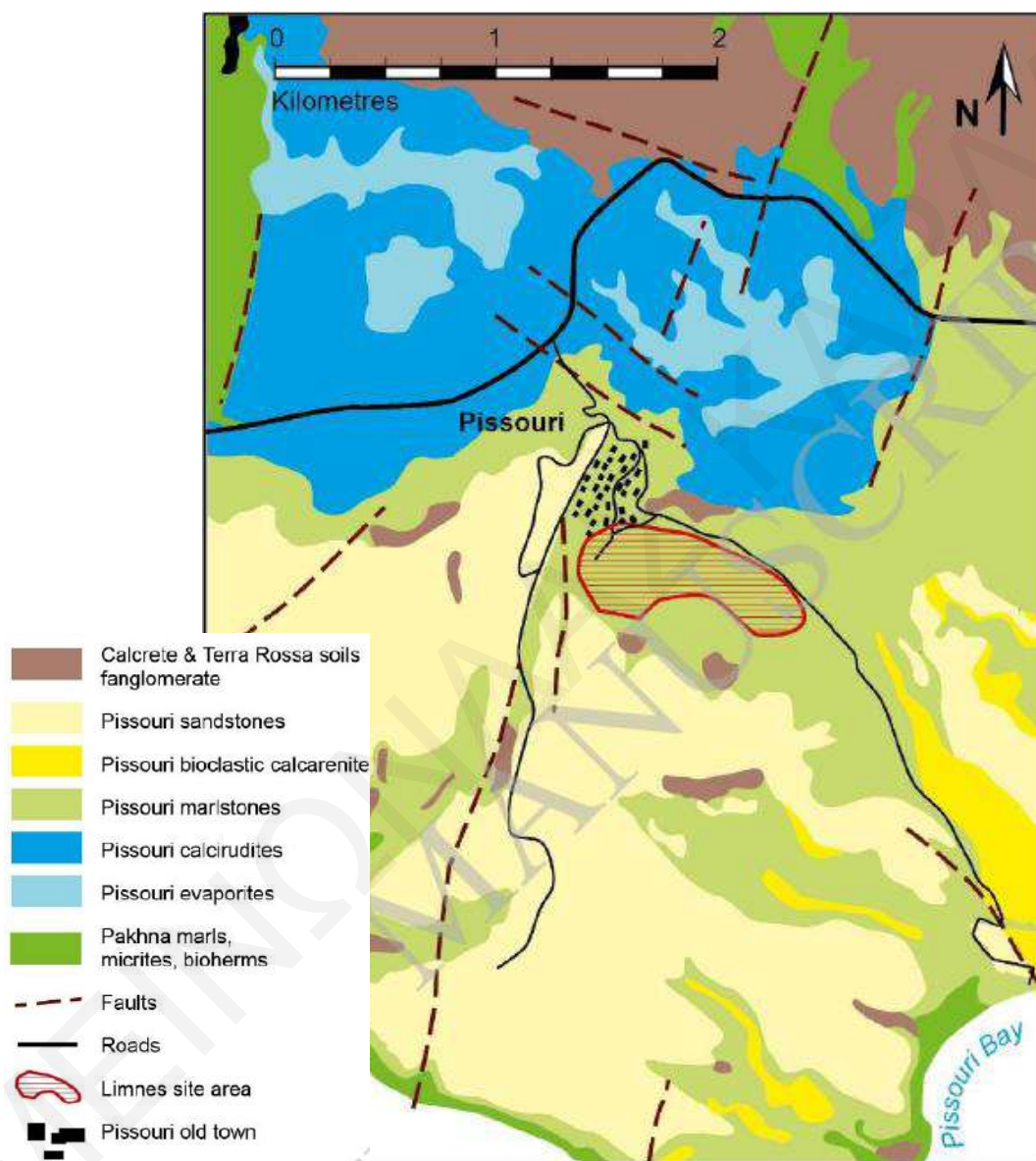
Οι τρεις γεωλογικοί χάρτες δεν είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους, αφού οι χάρτες των Alexandris et al. (2017) και Hearn et al. (2018) προέρχονται από αυτόν του Stow et al. (1995). Όμως η ανάλυση των γραφικών τους όπως αυτή εμφανίζεται στα δημοσιευμένα άρθρα είναι διαφορετική, με την ανάλυση του χάρτη των Stow et al. (1995) να είναι η λιγότερο καλή λόγω της παλαιότητας της δημοσίευσης. Συνεπώς και οι τρεις χάρτες (πρακτικώς οι τρεις εκδοχές του χάρτη των Stow et al.) λήφθηκαν υπόψη ώστε να μετριασθεί το σφάλμα της ψηφιοποίησης.

Παρατηρώντας τους γεωλογικούς χάρτες γίνεται αντιληπτό ότι το υπέδαφος της περιοχής μελέτης αποτελείται από μάργα, ασβεστορρουδίτη και γύψο. Στον χάρτη των Alexandris et al. (2017), Σχήμα 3.1, η μάργα αποδίδεται με ανοικτό πράσινο χρώμα, ο ασβεστορρουδίτης με λευκά τούβλα και ο γύψος με ανοικτό καφέ χρώμα.



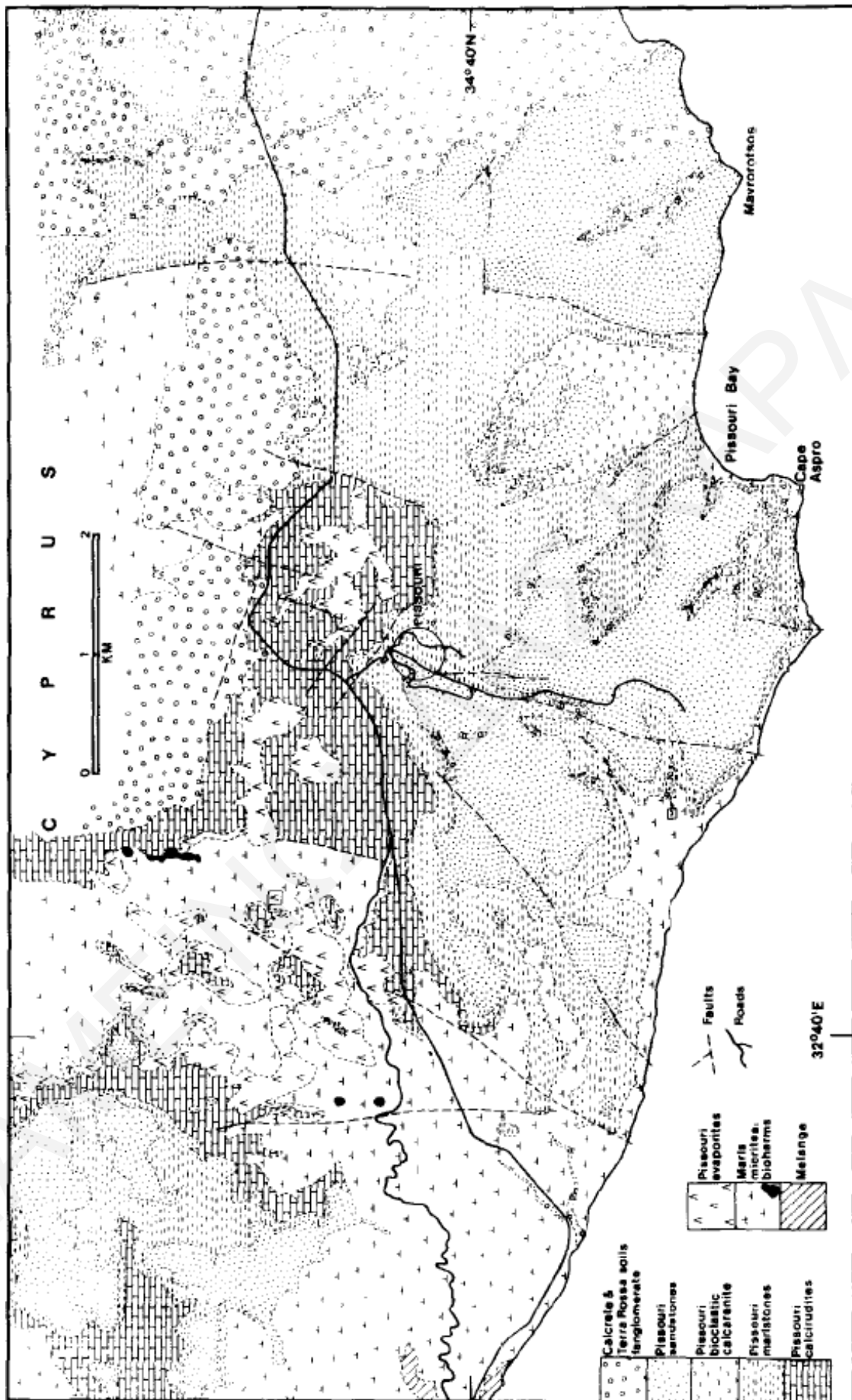
Σχήμα 3.1. Γεωλογικός χάρτης από Alexandris et al. (2017).

Στον χάρτη των Hearn et al. (2018), Σχήμα 3.2, η μάργα παρουσιάζεται με πράσινο, ο ασβεστορρουδίτης με μπλε και ο γύψος με γαλάζιο χρώμα.



Σχήμα 3.2. Γεωλογικός χάρτης από Hearn et al. (2018).

Στον χάρτη του Stow et al. (1995), Σχήμα 3.3, η μάργα απεικονίζεται με πυκνές παύλες, ο ασβεστορρουδίτης με λευκά τούβλα και ο γύψος με αραιά σχήματα που έχουν τη μορφή κεφαλαίου λάμδα (Λ).

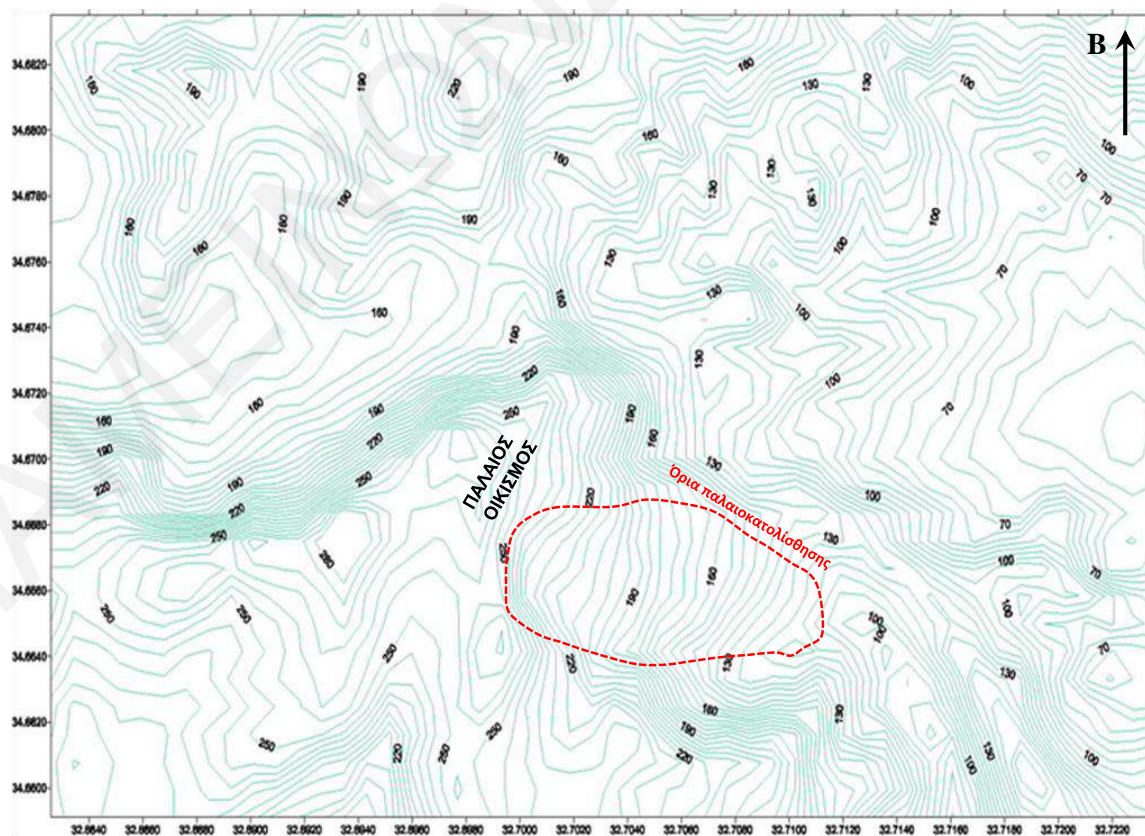


Σχήμα 3.3. Γεωλογικός χάρτης Stow et al. (1995).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2, στην περιοχή της κατολίσθησης εμφανίζεται επιφανειακά μόνο μάργα του γεωλογικού σχηματισμού Λευκωσίας. Τα νεότερα χονδρόκοκκα υλικά (ψαμμίτες) εμφανίζονται δυτικότερα, στην κορυφή του λόφου του παλαιού οικισμού. Ο ασβεστορροδίτης και ο γύψος αποκαλύπτονται επιφανειακά εντός ρεμάτων στην περιοχή με χαμηλό υψόμετρο αμέσως βορειότερα της κατολίσθησης.

3.1.2 Χάρτες ισοϋψών καμπύλων

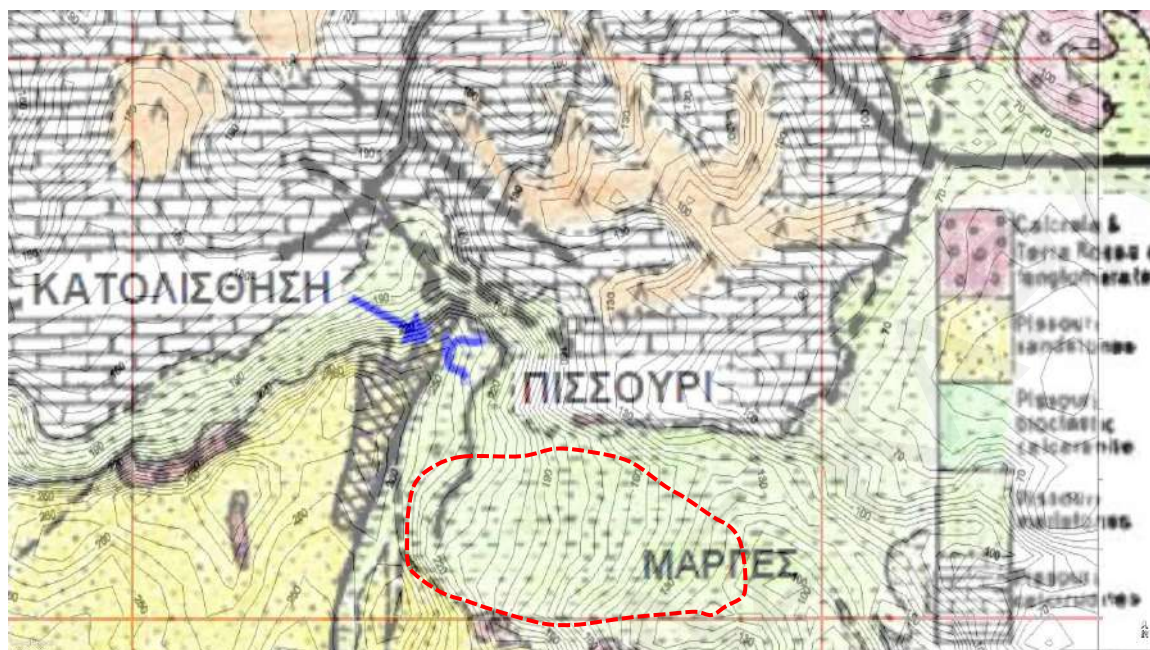
Χρησιμοποιήθηκαν δυο σετ ισοϋψών καμπύλων με ισοδιάσταση 5m. Το πρώτο σετ δημιουργήθηκε αξιοποιώντας τα υψομετρικά δεδομένα του Google Earth (δεδομένα Shuttle Radar Topography Mission, SRTM με κάρναβο 1-arcsec ή $\approx 30\text{m}$). Για την εξαγωγή των δεδομένων δημιουργήθηκαν πυκνοί οριζόντιοι και κάθετοι μαϊανδροί που κάλυπταν σε έκταση την κοινότητα Πισσουρίου, περιλαμβάνοντας την περιοχή της κατολίσθησης. Το δεύτερο σετ ισοϋψών προέρχονταν από τον διαδικτυακό τόπο OpenDEM (OpenDemEurope με κάρναβο 1-arcsec). Τα δεδομένα αυτά εισήχθησαν στο πρόγραμμα Surfer και προέκυψαν δυο χάρτες ισοϋψών, οι οποίοι δεν παρουσίαζαν σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ τους. Ο χάρτης με βάση τα δεδομένα υψομετρίας του Google Earth παρατίθεται στο Σχήμα 3.4.



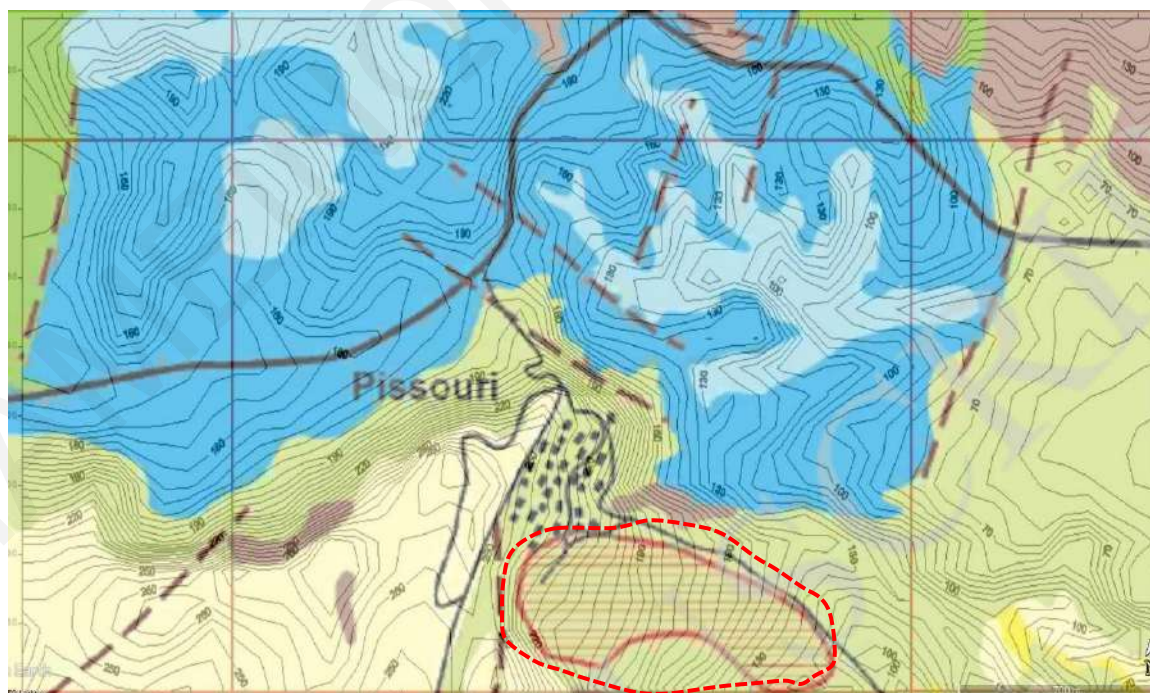
Σχήμα 3.4. Χάρτης ισοϋψών περιοχής Πισσουρίου με βάση τα στοιχεία του Google Earth.

3.1.3 Χάρτες για την μελέτη της στρωματογραφίας

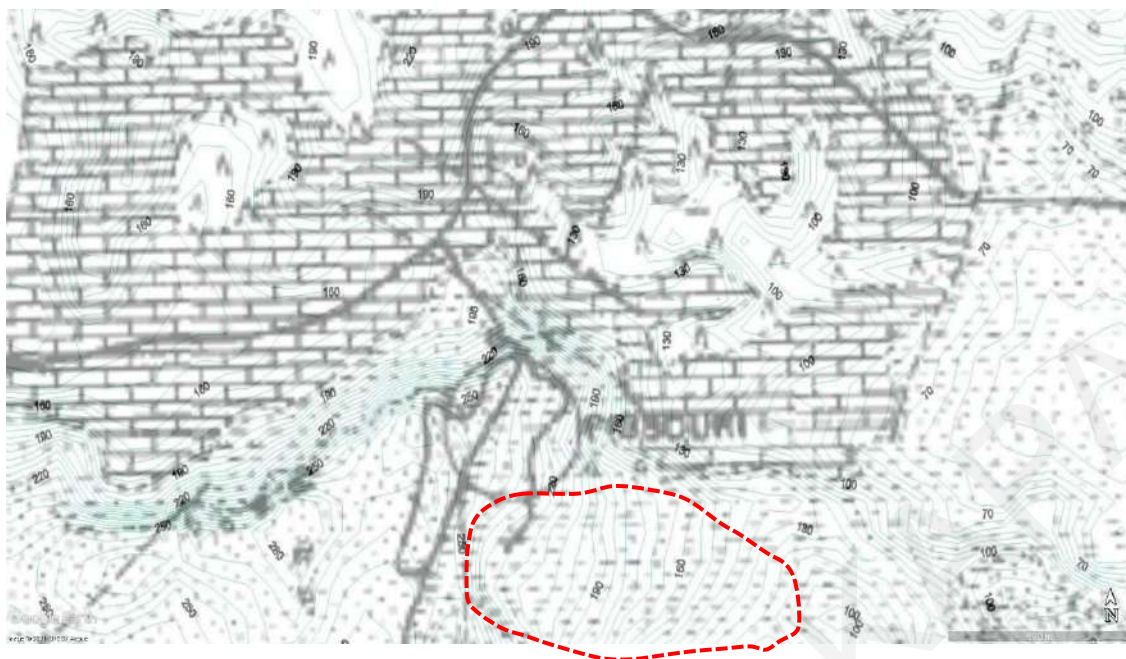
Οι χάρτες που προέκυψαν από τον συνδυασμό των γεωλογικών χαρτών και των χαρτών ισοϋψών καμπύλων παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.5, 3.6 και 3.7.



Σχήμα 3.5. Γεωλογικός χάρτης από Alexandris et al. (2017) σε συνδυασμό με ισοϋψείς καμπύλες από το OpenDEM. Σημ.: με μπλε βέλος υποδεικνύεται η θέση της κατολίσθησης στην οδό Ανεξαρτησίας, την οποία μελέτησαν οι Alexandris et al. (2017).



Σχήμα 3.6. Γεωλογικός χάρτης από Hearn et al. (2018) σε συνδυασμό με ισοϋψείς καμπύλες από το OpenDEM.



Σχήμα 3.7. Γεωλογικός χάρτης των Stow et al. (1995) σε συνδυασμό με ισοϋψείς καμπύλες από το Google Earth.

3.1.4 Διαδικασία σχεδιασμού γεωλογικής τομής

Για την δημιουργία της γεωλογικής τομής στην περιοχή της κατολίστησης στις Λίμνες Πισσουρίου εξετάστηκαν οι επαφές μεταξύ μάργας–ασβεστορρουδίτη και ασβεστορρουδίτη–γύψου. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η παρουσία ισοϋψούς που να τέμνει το ίχνος επαφής μεταξύ δυο πετρωμάτων στον γεωλογικό χάρτη, και στην περίπτωση που υπήρχε σημείο τομής αυτό καταγράφονταν. Ακολούθως αναζητούνταν δεύτερο ή και περισσότερα σημεία τομής μεταξύ της ίδιας ισοϋψούς καμπύλης και του ίχνους επαφής μεταξύ των ίδιων πετρωμάτων. Με βάση αυτά τα σημεία στη συνέχεια χαράσσονταν μια ευθεία γραμμή, η οποία αποτελεί την παράταξη (structure contour) του επιπέδου επαφής των δυο στρωμάτων με υψόμετρο ίσο με το υψόμετρο της αντίστοιχης ισοϋψούς. Ο σχεδιασμός παρατάξεων των επαφών μάργας–ασβεστορρουδίτη και ασβεστορρουδίτη–γύψου καθίσταται δυνατός στην περιοχή χαμηλού υψομέτρου βόρεια της παλαιοκατολίστησης, όπου λόγω της ύπαρξης δικτύου ρεμάτων αποκαλύπτονται επιφανειακά τα στρώματα ασβεστορρουδίτη και γύψου.

Λόγω αβεβαιοτήτων και σχεδιαστικού σφάλματος, για την εκτίμηση της κλίσης των επιπέδων επαφής των στρωμάτων θεωρήθηκε απαραίτητη η ύπαρξη το λιγότερο τριών ή τεσσάρων παρατάξεων των οποίων τα σημεία που τις ορίζουν να είναι όσο το δυνατόν πιο

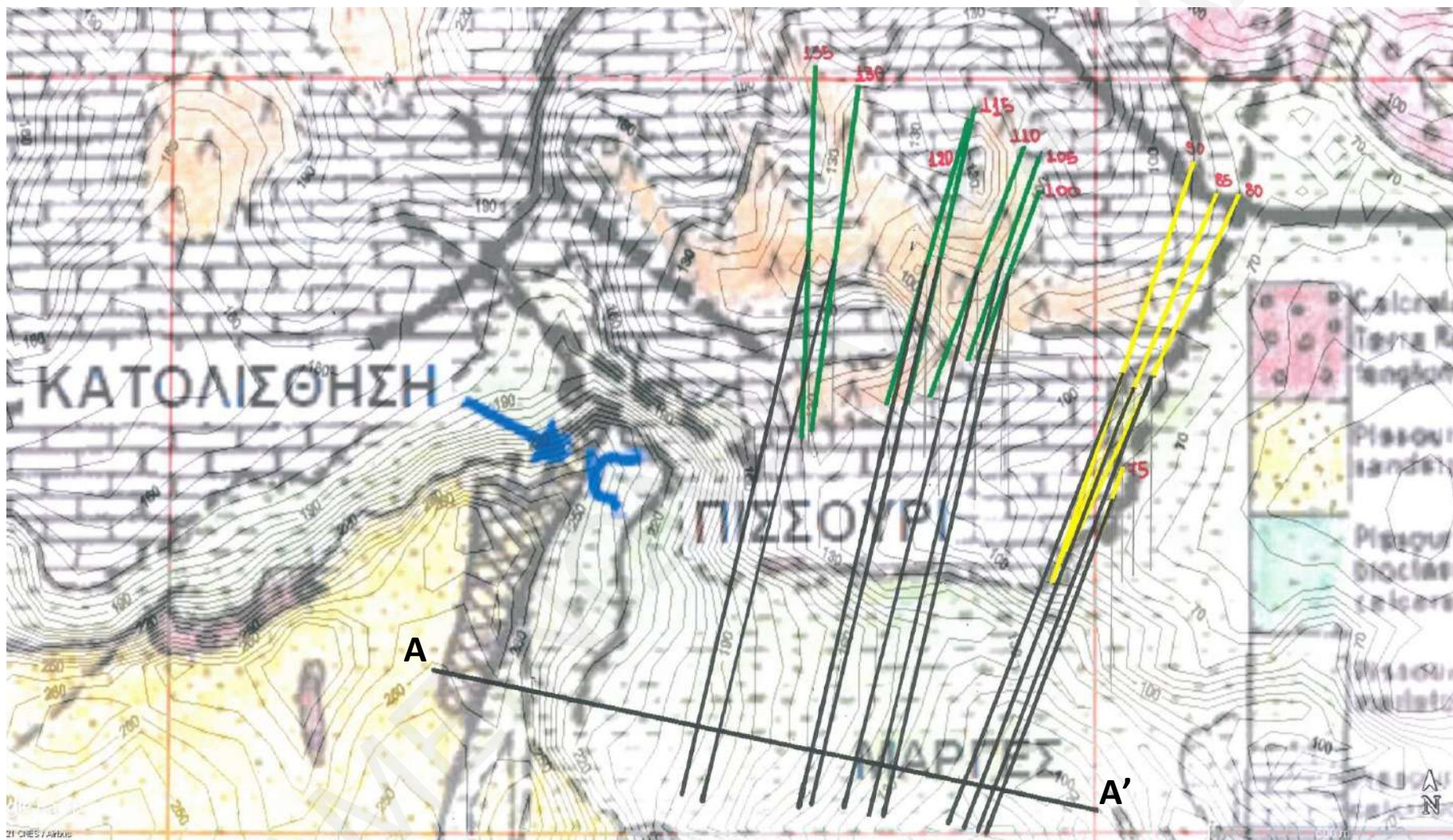
απομακρυσμένα μεταξύ τους, καθώς τα σμιχτά σημεία οδηγούν σε λιγότερο ακριβή αποτελέσματα σε ότι αφορά τη σχεδίαση των παρατάξεων. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε και για τις δυο επαφές σε όλη την έκταση των διαθέσιμων γεωλογικών χαρτών.

Με την δημιουργία όλων των δυνατών παρατάξεων μεταξύ μάργας–ασβεστορρουδίτη και ασβεστορρουδίτη–γύψου, θεωρήθηκε ένας μέσος προσανατολισμός (strike) παρατάξεων ανά επαφή. Για παράδειγμα, ο μέσος όρος της γωνίας όλων των παρατάξεων της επαφής μάργας-ασβεστορρουδίτη στον χάρτη του Σχήματος 3.8 μετρώντας ωρολογιακά από τον άξονα βορράς-νότος (B-N) υπολογίστηκε 21°. Επίσης τα υψόμετρα των παρατάξεων μειώνονται προς τα ανατολικά. Συνεπώς, η κατεύθυνση της μέσης κλίσης της επιφάνειας επαφής μάργας-ασβεστορρουδίτη (dip direction) είναι B111°. Αντίστοιχα, για την επαφή ασβεστορρουδίτη και γύψου η μέση τιμή της απόκλισης από τον άξονα B-N εκτιμάται στις 13° και η κατεύθυνση (αζιμούθιο) της κλίσης σε B103°. Τα αποτελέσματα μέσου όρου κατεύθυνσης κλίσης των επαφών των στρωμάτων παρατίθενται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1. Μέση κατεύθυνση κλίσης (dip direction) επαφών στρωμάτων.

Μέση κατεύθυνση κλίσης επαφών (αζιμούθιο)		
	Μάργα-Ασβεστορρουδίτης	Ασβεστορρουδίτης-Γύψος
Σχήμα 3.8	B111°	B103°
Σχήμα 3.10	B111°	B109°
Σχήμα 3.12	B110°	B111°

Κατά μέσο όρο, η κατεύθυνση της κλίσης των στρωμάτων είναι περίπου B110°, η οποία σχεδόν ταυτίζεται με την κατεύθυνση B112° των μετακινήσεων που καταγράφηκαν την περίοδο 2017-2019 (Hearn et al., 2020), ενώ έχει μόλις 8° αζιμουθιακή διαφορά από τον θεωρούμενο άξονα της παλαιοκατολίστησης (B102°). Αυτές οι παρατηρήσεις συντείνουν στο ότι η παλαιοκατολίστηση πιθανόν να συνέβη πάνω σε επιφάνειες διαστρωμάτωσης, όπου η αντοχή τριβής είναι εγγενώς μικρότερη από την αντοχή του ακεραίου πετρώματος ή ημίβραχου, με το ρήγμα στο δυτικό άκρο της τομής (διακεκομμένη γραμμή πλησίον του σημείου Α, Σχήμα 3.10) να λειτουργεί εν μέρει ως επιφάνεια απελευθέρωσης. Έναυσμα για την έναρξη της παλαιοκατολίθησης ενδέχεται να αποτέλεσε κάποιο προϊστορικό σεισμικό γεγονός στην ευρύτερη περιοχή της δυτικής Κύπρου ή ακόμη και με προέλευση τα ενεργά ρήγματα που βρίσκονται μόλις λίγα χιλιόμετρα από το Πισσούρι (Σχ. 2.13).

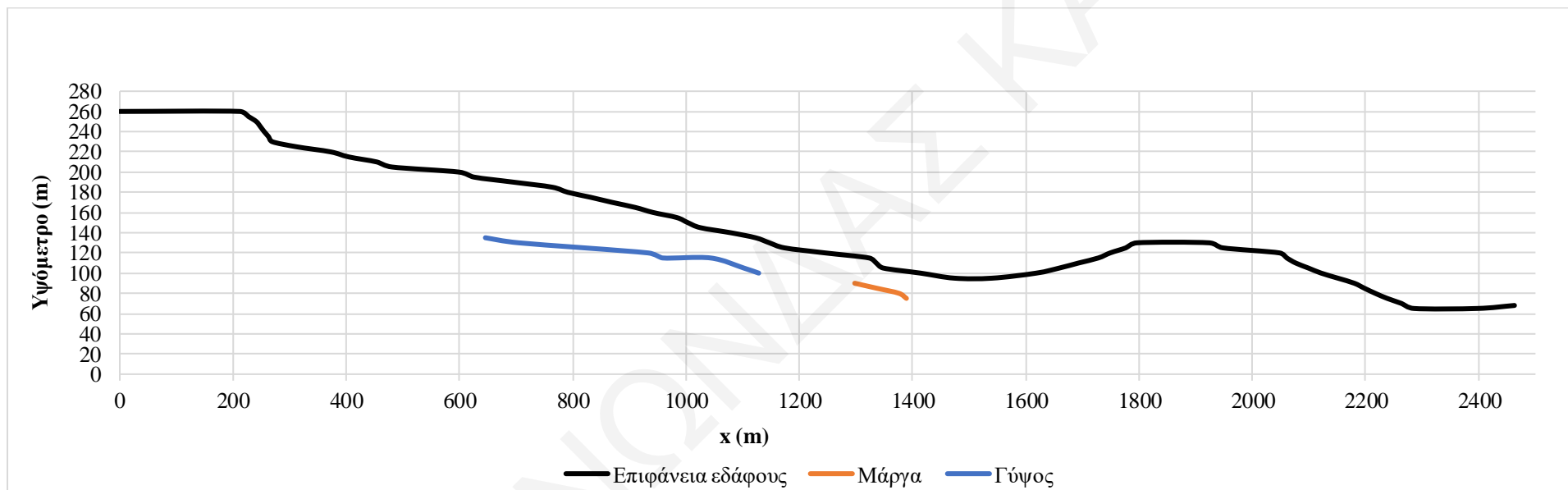


Σχήμα 3.8. Σχεδιασμός παρατάξεων (structure contours) με βάση τον γεωλογικό χάρτη από Alexandris et al. (2017).

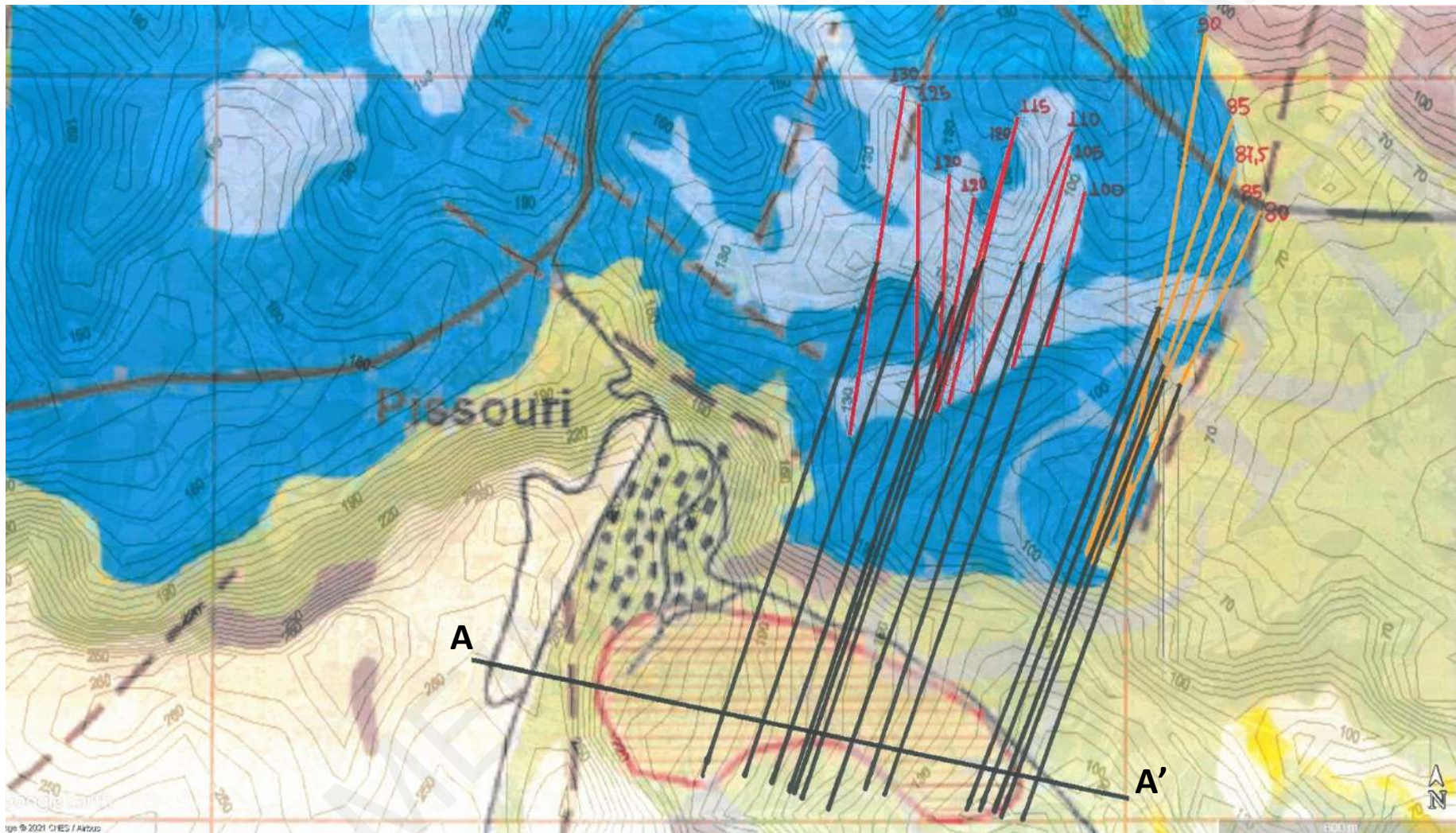
Ακολουθως, με σημείο έναρξης το μέσο της σχεδιασμένης παρατάξης, σχεδιάστηκαν προσεγγιστικές παρατάξεις παράλληλες μεταξύ τους που είχαν διεύθυνση ίση με τον μέσο όρο (Σχήματα 3.8, 3.10, 3.12). Οι νέες αυτές παρατάξεις προεκτάθηκαν μέχρι να τμήσουν την κατακόρυφη τομή ανάλυσης της κατολίσθησης (τομή A-A'). Η τομή A-A' έχει προσανατολισμό (αζιμούθιο) $B102^\circ$, ο οποίος επιλέχθηκε να είναι ίσος με την μέση κατεύθυνση κλίσης του εδάφους στο κύριο σώμα της παλαιοκατολίσθησης, και πρακτικώς ταυτίζεται με τον διαμήκη άξονα της παλαιοκατολίσθησης. Πρέπει να σημειωθεί ότι στα Σχήματα 3.8, 3.10 και 3.12 δεν εμφανίζεται το σύνολο των παρατάξεων που σχεδιάστηκαν για τον υπολογισμό της κλίσης των στρωμάτων αλλά μόνο οι παρατάξεις που προβλήθηκαν στην τομή με την παραπάνω μέθοδο.

Τα Σχήματα 3.9, 3.11 και 3.13 παρουσιάζουν τις τομές που προκύπτουν με βάση τους χάρτες των Σχημάτων 3.8, 3.10 και 3.12, αντίστοιχα. Οι επαφές μεταξύ των στρωμάτων εμφανίζουν γενικά κλίση προς τα ανατολικά αλλά λόγω της περιορισμένης ακρίβειας της γραφικής επίλυσης και των χαρτών (γεωλογικών και τοπογραφικών) αυτών καθ'αυτών η γωνία κλίσης δεν είναι σταθερή και εμφανίζει ακανόνιστες διακυμάνσεις. Εντούτοις, εξετάζοντας παράλληλα τα Σχήματα 3.9, 3.11 και 3.13 αποκτάται μια γενική εικόνα για τη γεωμετρία των στρωμάτων μάργας, ασβεστορρουδίτη και γύψου στην περιοχή του Πισσουρίου.

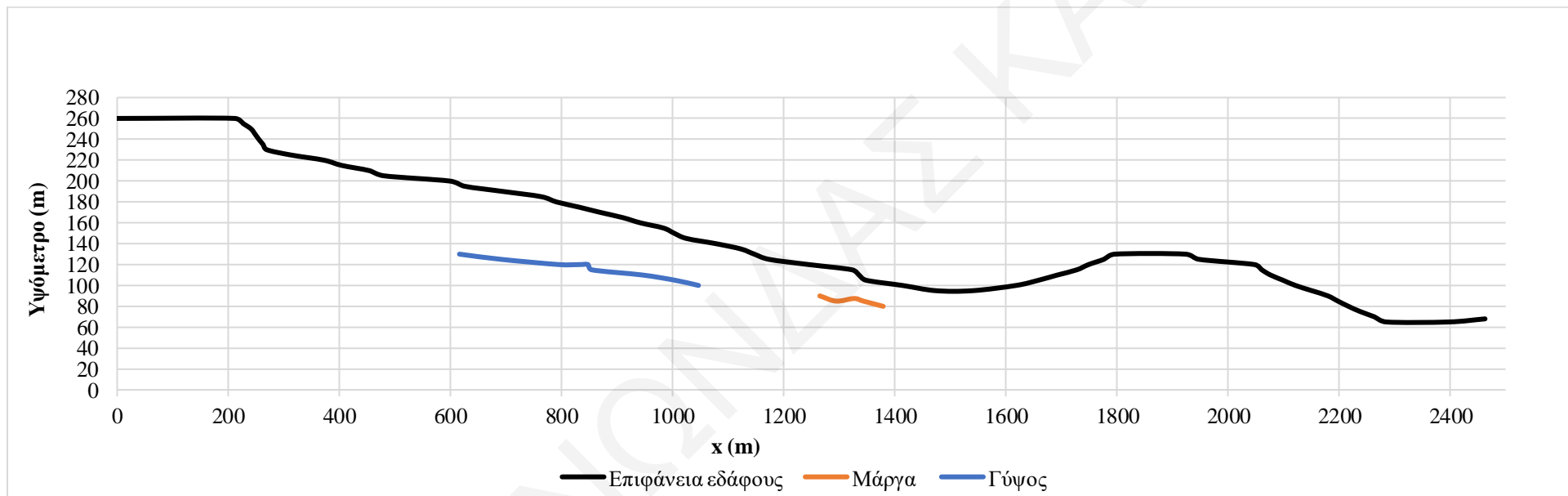
Για τη συμπλήρωση της γεωλογικής τομής σε όλη την έκταση του άξονα A-A' συντέθηκαν οι τομές των Σχημάτων 3.9, 3.11 και 3.13 και θεωρήθηκαν επίπεδες επαφές μεταξύ των στρωμάτων. Η απλοποιημένη γεωλογική τομή που προέκυψε, και η οποία χρησιμοποιείται στην συνέχεια στις αναλύσεις στο Plaxis 2D, παρατίθεται στα Σχήματα 3.14 και 3.15. Η φαινόμενη γωνία κλίσης επί της τομής A-A' ($B102^\circ$) είναι 5.25° , που αντιστοιχεί σε πραγματική γωνία κλίσης 5.31° κατά το αζιμούθιο κατεύθυνσης $B111^\circ$ της κλίσης των επιφανειών διαστρωμάτωσης. Το κατακόρυφο πάχος του στρώματος ασβεστορρουδίτη είναι 13m. Η επαφή μεταξύ μάργας και ασβεστορρουδίτη απαντάται στην περιοχή της παλαιοκατολίσθησης στα 23m βάθος (στον πόδα) έως 49m βάθος (στην κεφαλή), ενώ η επαφή ασβεστορρουδίτη-γύψου στα 36m και 62m βάθος, αντίστοιχα. Στην περιοχή του κυρίου σώματος της παλαιοκατολίσθησης, το μέσο βάθος της επαφής μάργας-ασβεστορρουδίτη προκύπτει 47m, ενώ της επαφής ασβεστορρουδίτη-γύψου 60m.



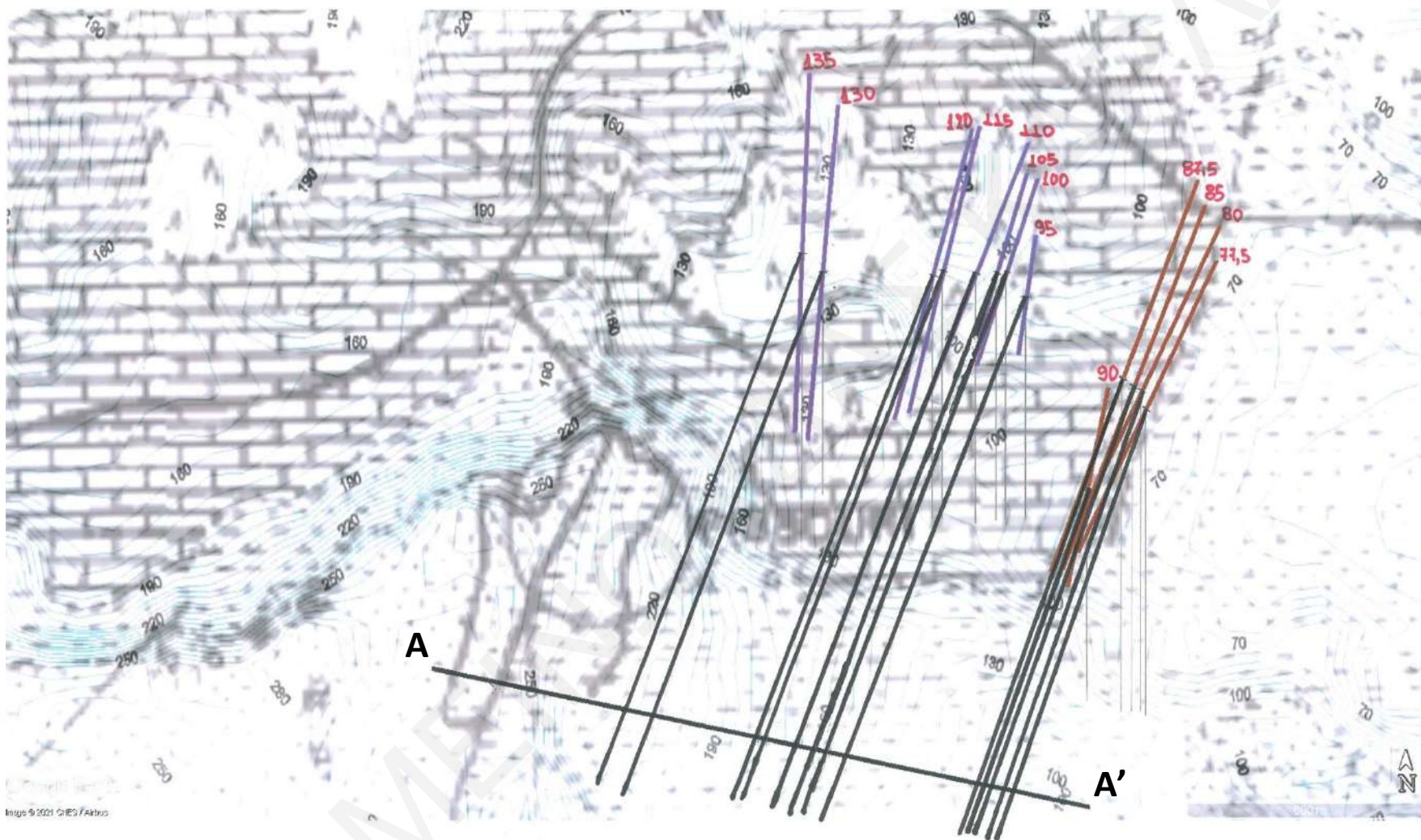
Σχήμα 3.9. Τομή κατά τον άξονα A-A' με βάση τον χάρτη του Σχήματος 3.8.



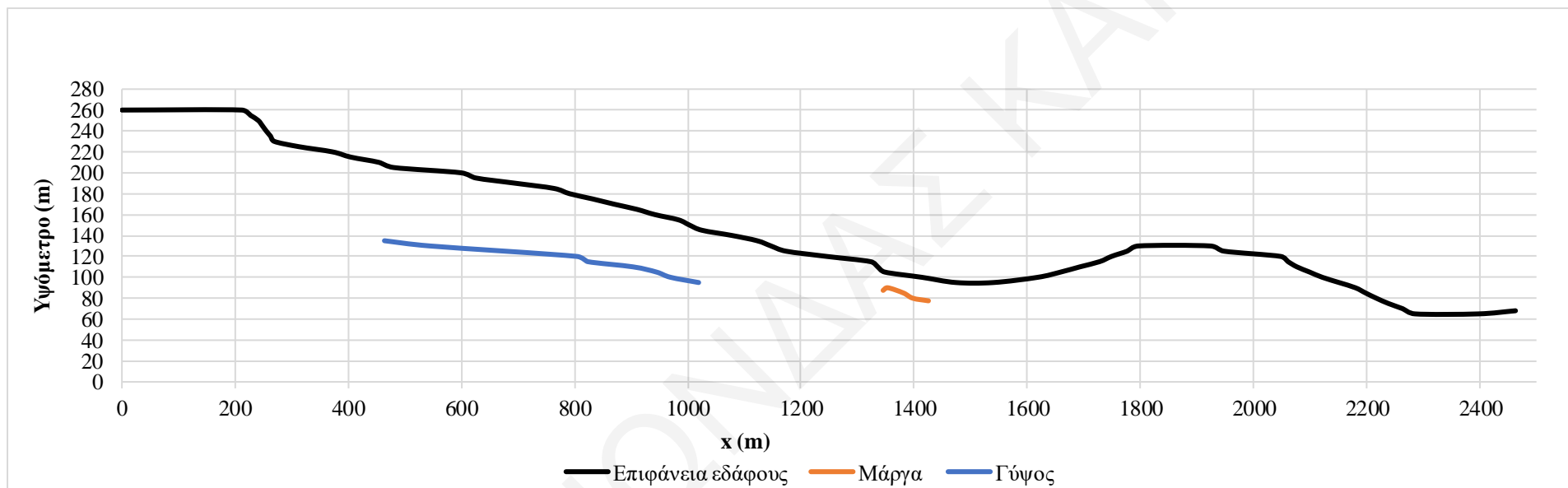
Σχήμα 3.10. Σχεδιασμός παρατάξεων (structure contours) με βάση τον γεωλογικό χάρτη από Hearn et al. (2018).



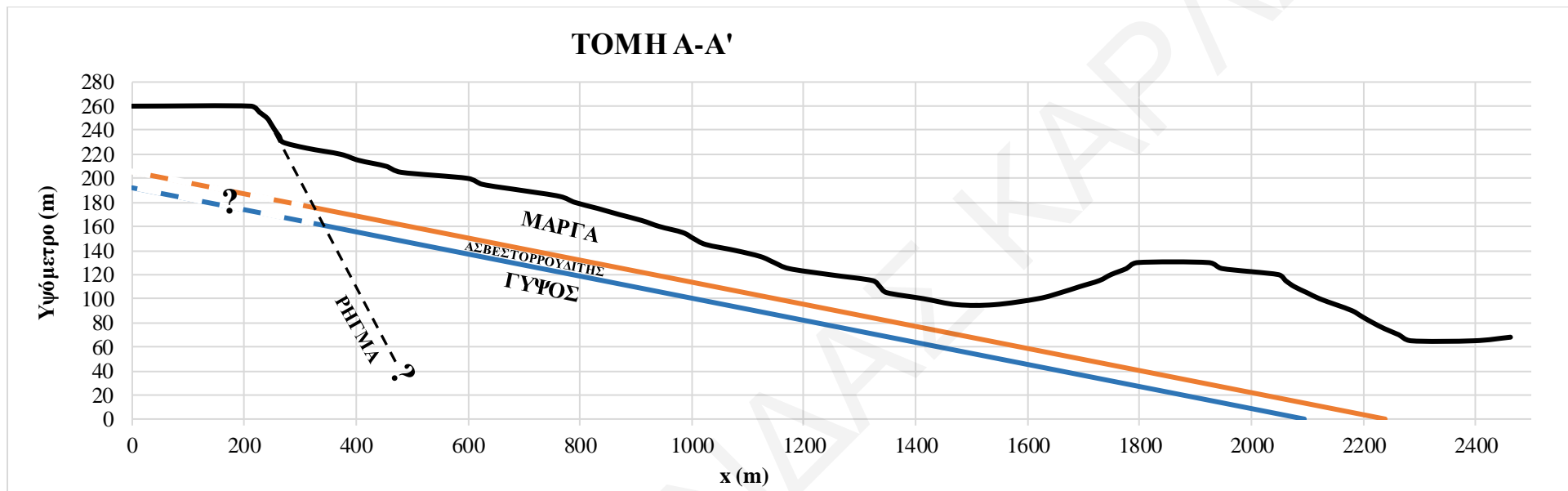
Σχήμα 3.11. Τομή κατά τον άξονα Α-Α' με βάση τον χάρτη του Σχήματος 3.10.



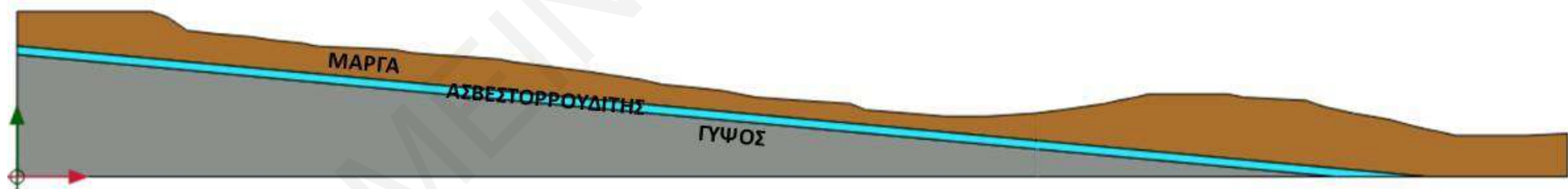
Σχήμα 3.12. Σχεδιασμός παρατάξεων (structure contours) με βάση τον γεωλογικό χάρτη των Stow et al. (1995).



Σχήμα 3.13. Τομή κατά τον άξονα Α-Α' με βάση τον χάρτη του Σχήματος 3.12.



Σχήμα 3.14. Απλοποιημένη γεωλογική τομή κατά τον άξονα Α-Α'.



Σχήμα 3.15. Απλοποιημένη τομή της περιοχής Λίμνες Πισσουρίου (άξονας Α-Α') όπως διαμορφώθηκε στο Plaxis 2D.

Ο γεωλογικός σχηματισμός Πάχνας, ο οποίος είναι υποκείμενος του γύψου (σχηματισμός Κανναβιού) που έχει πάχος περίπου 40m (Stow et al., 1995), δεν εξετάστηκε και δεν σχεδιάστηκε στη τομή A-A' του Σχήματος 3.15 γιατί δεν δύναται να εμπλέκεται στο φαινόμενο της κατολίσθησης λόγω των υψηλών αντοχών των πετρωμάτων του σχηματισμού Πάχνας και του γύψου. Επίσης, δεν σχεδιάστηκε το ρήγμα που εφάπτεται στο δυτικό άκρο της παλαιοκατολίσθησης αφού η επιφάνεια ολίσθησης θα σχεδιαστεί ως δεδομένο εισαγωγής σε κάθε μια από τις αντίστροφες αναλύσεις ευστάθειας στο Plaxis 2D.

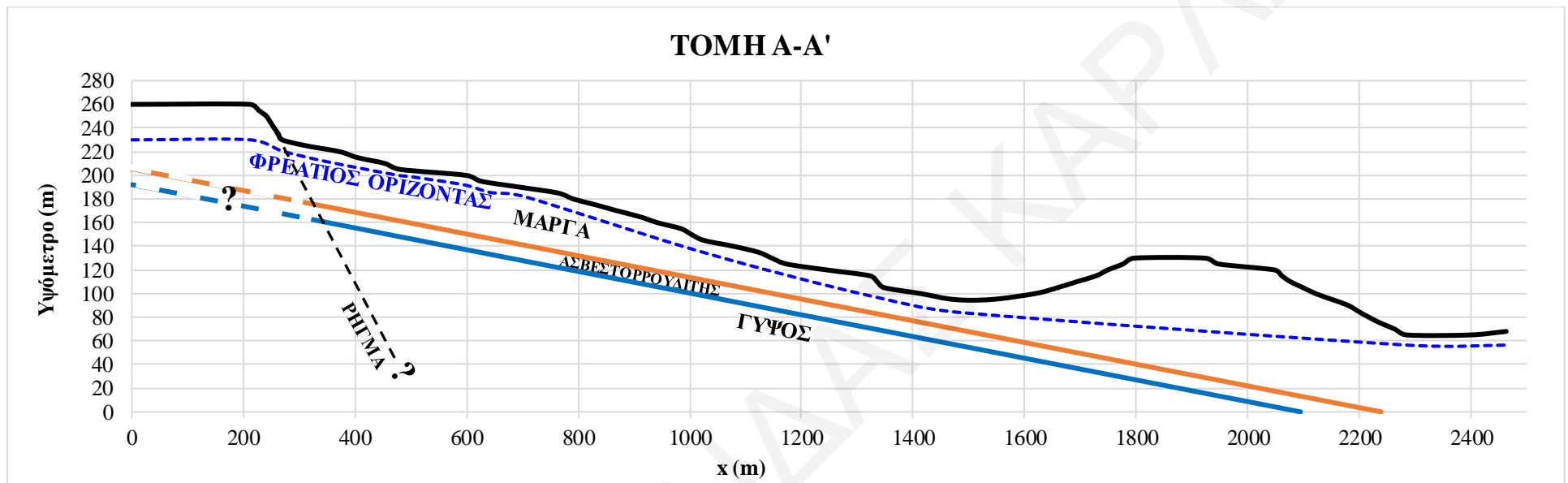
Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η κατεύθυνση κίνησης της τρέχουσας κατολίσθησης αναμένεται να ταυτίζεται με αυτή της παλαιοκατολίσθησης ή να έχει μόνο μικρή αζιμουθιακή διαφορά από αυτή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός της παρουσίας της επιφάνειας ολίσθησης της παλαιοκατολίσθησης εντός του υπεδάφους της περιοχής, όπου η διάτμηση που έχει υποστεί το έδαφος εκεί έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη slickensides και στη μείωση της γωνίας τριβής στην παραμένουσα τιμή της (residual friction angle). Η μείωση της αντοχής από τη μέγιστη στην παραμένουσα όσο διατμάται ένα αργιλικό έδαφος προς μια κατεύθυνση οφείλεται στο ότι τα αργιλικά πλακίδια περιστρέφονται σταδιακά και παίρνουν προσανατολισμό παράλληλο με το επίπεδο ολίσθησης. Έτσι, το επίπεδο ολίσθησης αποκτά λεία υφή με ραβδώσεις που έχουν διεύθυνση ίδια με τη διεύθυνση της διάτμησης (slickensiding). Λόγω όμως αυτών των ραβδώσεων, η παραμένουσα διατμητική αντοχή ισχύει μόνο για διάτμηση κατά τη διεύθυνσή τους. Αν επιβληθεί εκ νέου διάτμηση στο υλικό επί του παλαιού επιπέδου ολίσθησης αλλά με διεύθυνση κίνησης εγκάρσια στις ραβδώσεις, η γωνία τριβής που θα κινητοποιηθεί θα είναι σαφώς μεγαλύτερη από την παραμένουσα εξαιτίας της τραχύτητας που προσδίδουν στην επιφάνεια ολίσθησης κατά την εγκάρσια διεύθυνση οι εν λόγω ραβδώσεις. Δηλαδή η παραμένουσα αντοχή αποτελεί μια έντονα κατευθυντική ιδιότητα (directional property). Επομένως, καθίσταται πολύ πιο πιθανό η τρέχουσα κατολίσθηση στο Πισσούρι να έχει την ίδια (ή ελάχιστα διαφορετική) διεύθυνση κίνησης με την παλαιοκατολίσθηση, αφού σε αντίθετη περίπτωση η διατμητική αντοχή του εδάφους θα ήταν μεγαλύτερη από την ελάχιστη δυνατή που είναι η παραμένουσα αντοχή.

3.2 Εκτίμηση φρεάτιου υδροφόρου ορίζοντα

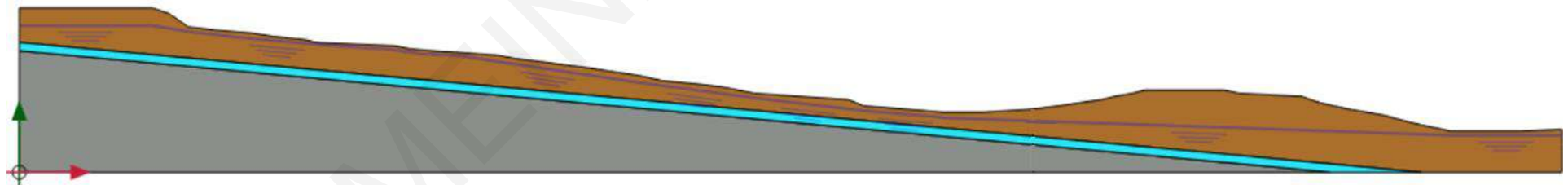
Η εκτίμηση του φρεάτιου υδροφόρου ορίζοντα της περιοχής μελέτης στηρίχθηκε σε μετρήσεις στάθμης νερού σε 21 γεωτρήσεις οι οποίες διενεργήθηκαν από το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης και οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις έγιναν στο διάστημα Σεπτέμβριος-Οκτώβριος του 2015. Οι γεωτρήσεις βρίσκονται διεσπαρμένες στην έκταση του κυρίου σώματος της παλαιοκατολίσθησης. Οι στάθμες των γεωτρήσεων τοποθετήθηκαν πάνω στην τομή A-A' με κάθετη προβολή στον άξονα, και ενώνοντας τα σημεία δημιουργήθηκε μια εικόνα του υδροφόρου ορίζοντα (Σχήμα 3.16) μεταξύ των συντεταγμένων $270m < x < 980m$. Εκτιμώντας ότι ο φρεάτιος ορίζοντας θα πρέπει να ακολουθεί σε γενικές γραμμές τη φυσική επιφάνεια του εδάφους και να μην παρουσιάζει απότομες αλλαγές κλίσης έγινε η προέκτασή του στα υπόλοιπα τμήματα της τομής και οι απαραίτητες τροποποιήσεις ώστε να προσεγγίζει ρεαλιστικά τον πραγματικό υδροφόρο. Ο φρεάτιος υδροφόρος της περιοχής παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.16 και 3.17.

Πίνακας 3.2. Στάθμη φρεάτιου υδροφόρου ορίζοντα σε γεωτρήσεις στην περιοχή Λίμνες Πισσουρίου.

Γεώτρηση	Βάθος στάθμης νερού (m)	Υψόμετρο επιφάνειας εδάφους (m)
Γ1	5.97	204.5
Γ2	5.93	204.5
Γ3	6.20	204.5
Γ4	7.86	207.0
NBH1	6.63	205.0
NBH2	8.24	202.0
NBH3	8.41	207.0
NBH4	8.17	198.5
NBH5	9.95	195.0
NBH6	8.42	188.0
NBH7	6.80	185.0
NBH8	12.08	218.0
NBH9	5.72	189.0
NBH10	11.75	198.0
NBH11	14.40	159.0
NBH12	8.95	188.0
A-Hearn et al. (2018)	10.36	221.8
B-Hearn et al. (2018)	7.80	204.2
C-Hearn et al. (2018)	8.06	200.1
D-Hearn et al. (2018)	7.27	187.9
E-Hearn et al. (2018)	14.11	154.6



Σχήμα 3.16. Παρουσίαση της στρωματογραφίας της περιοχής του Πισσουρίου έχοντας ενσωματώσει τον φρεάτιο υδροφόρο ορίζοντα.



Σχήμα 3.17. Στάθμη υπόγειου νερού στο μοντέλο που δημιουργήθηκε στο Plaxis 2D.

3.3 Κατακόρυφα φορτία στην περιοχή μελέτης

Μια παράμετρος που κρίθηκε απαραίτητο να ληφθεί υπόψη στη μελέτη της κατολίσθησης του Πισσουρίου ήταν η επιβάρυνση από κατακόρυφα φορτία που προέρχονταν από τα κτίρια που έχουν κατασκευαστεί στην περιοχή. Για την εκτίμηση των φορτίων η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε τέσσερα πολύγωνα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.18, η έκταση των οποίων καθορίστηκε από τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής και από την πυκνότητα δόμησης σε κάθε ένα από αυτά. Σε κάθε πολύγωνο μετρήθηκε ο αριθμός των κτισμάτων, ο αριθμός των ορόφων που περιλαμβάνουν και το συνολικό τους εμβαδόν. Ακολούθως εκτιμήθηκε το συνολικό φορτίο κάθε κτίσματος θεωρώντας ότι κάθε όροφος επιβάλλει στη στάθμη θεμελίωσης πίεση ίση με 12kPa. Τέλος, για την εκτίμηση της ανηγμένης ισοδύναμης πίεσης σε όλο το πλάτος της κατολίσθησης, υπολογίστηκε το γινόμενο του εμβαδού κάθε κτίσματος με την πίεση επαφής που επιβάλλει στο έδαφος, και στη συνέχεια το άθροισμα όλων των γινομένων εντός του εκάστοτε πολυγώνου διαιρέθηκε με το συνολικό εμβαδόν του πολυγώνου.



Σχήμα 3.18. Διαχωρισμός της περιοχής μελέτης σε πολύγωνα για τον υπολογισμό των ισοδύναμων φορτίων των κτισμάτων.

Το δυτικότερο πολύγωνο (πολύγωνο 1), που εντοπίζεται στο αριστερό τμήμα του Σχήματος 3.18, περιλαμβάνει την περιοχή ανάντη της παλαιοκατολίσθησης που βρίσκεται πλησιέστερα στην κύρια κατακρήμνιση (στέψη). Στο εν λόγω πολύγωνο καταγράφηκαν αρκετά κτίσματα και είναι το πολύγωνο με την πυκνότερη δόμηση. Το πολύγωνο εκτείνεται 227m από την

στέψη και η ανηγμένη ισοδύναμη πίεση εκτιμήθηκε στα 4.48kPa. Το δεύτερο πολύγωνο βρίσκεται στο δυτικό τμήμα της παλαιοκατολίσθησης και είναι εξολοκλήρου στη ζώνη απομείωσης. Στο πολύγωνο αυτό παρατηρείται αραιή δόμηση, με αποτέλεσμα η ανηγμένη ισοδύναμη πίεση να είναι σαφώς μικρότερη (2.95kPa) από ότι στο πολύγωνο 1. Το πολύγωνο 3 περιλαμβάνει την κύρια οικιστική ανάπτυξη εντός του χώρου της παλαιοκατολίσθησης. Στο εν λόγω πολύγωνο παρατηρείται αρκετά μεγάλος αριθμός κτισμάτων, που στην πλειοψηφία τους είναι διώροφα. Στο τέταρτο (ανατολικότερο) πολύγωνο υπάρχει περιορισμένος αριθμός κτισμάτων, τα οποία είναι αραιά κτισμένα. Τα κυριότερα στοιχεία των πολυγώνων παρατίθενται συνοπτικά στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3. Κυριότερα στοιχεία πολυγώνων υπολογισμού ισοδύναμων φορτίων.

Πολύγωνο	Αριθμός κτισμάτων	Αριθμός ορόφων	Δομημένο εμβαδόν (m ²)	Εμβαδόν πολυγώνου (m ²)	Ανηγμένη ισοδύναμη πίεση (kPa)
1	73	101	33691	90244	4.48
2	35	63	19050	77492	2.95
3	71	127	48990	102239	5.75
4	49	86	20783	146707	1.70

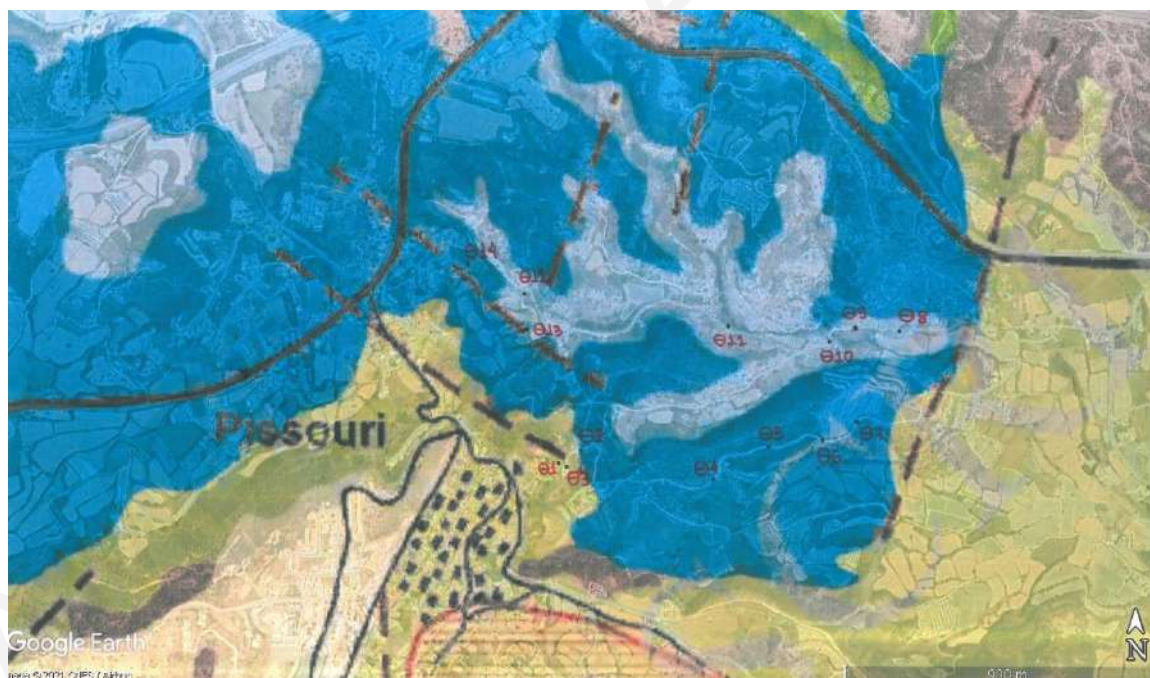
3.4 Εκτίμηση παραμέτρων αντοχής των γεωϋλικών της περιοχής

Τα υλικά που συναντώνται στο υπέδαφος της περιοχής που εκδηλώθηκε η κατολίσθηση στο Πισσούρι είναι η μάργα, ο ασβεστορρουδίτης και ο γύψος. Ο καθορισμός των παραμέτρων αντοχής της μάργας (συνοχή και γωνία τριβής) περιλαμβάνει δυο σκέλη. Το πρώτο σκέλος αφορά την αντοχή της «αδιατάρακτης» μάργας, δηλαδή της μάργας που δεν έχει αστοχήσει σε διάτμηση στο παρελθόν. Το δεύτερο σκέλος πραγματεύεται τις αντίστοιχες παραμέτρους αντοχής για τα τμήματα της μάργας που έχουν διατμηθεί στο παρελθόν λόγω της παλαιοκατολίσθησης στην περιοχή των Λιμνών και που εντοπίζονται στην επιφάνεια ολίσθησης. Οι παράμετροι αντοχής της μάργας εκτιμήθηκαν μέσω βιβλιογραφικής έρευνας με αντικείμενο μελέτες που πραγματεύονταν τα αργιλικά πετρώματα της Κύπρου. Όσον αφορά τον ασβεστορρουδίτη και τον γύψο, έγινε επίσκεψη στο Πισσούρι, πάρθηκαν φωτογραφίες και συλλέχθηκαν δείγματα από δεκατέσσερις θέσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.19. Οι παράμετροι συνοχής και γωνίας

τριβής του ασβεστορρουδίτη και του γύψου εκτιμήθηκαν με βάση το σύστημα ταξινόμησης βραχώμαζας GSI (Marinos & Hoek 2000,2001) και το πρόγραμμα Roclab της Rocscience Inc. Εκτός από τον δείκτη GSI, βασική παράμετρος εισαγωγής στο πρόγραμμα Roclab είναι η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη του ακεραίου πετρώματος σ_{ci} .

3.4.1 Δοκιμές σημειακής φόρτισης σε ασβεστορρουδίτη και γύψο

Για την εκτίμηση του σ_{ci} των σχετικά σκληρών πετρωμάτων, δηλαδή του ασβεστορρουδίτη και του γύψου, εκτελέστηκαν δοκιμές σημειακής φόρτισης σε επιφανειακά δείγματα (τεμάχια ακανόνιστου σχήματος) που συλλέχθηκαν από το πεδίο. Τα αποτελέσματα των δοκιμών σημειακής φόρτισης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4. Για τη μετατροπή του δείκτη σημειακής φόρτισης (I_s) σε αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης θεωρήθηκε συντελεστής $K=24$ (ISRM, 1981).



Σχήμα 3.19. Θέσεις επιφανειακής δειγματοληψίας.

Η αντοχή των τεμαχίων ασβεστορρουδίτη (ανηγμένη σε ισοδύναμη διάμετρο 50mm) κυμαίνεται από 7MPa έως 80MPa ανάλογα με το βαθμό διάβρωσης και διαταραχής της επιφανειακής εμφάνισής του. Ο ασβεστορρουδίτης στη θέση Θ4 φαίνεται να είναι μεγάλης σκληρότητας (μέσο $\sigma_{ci} \approx 60\text{MPa}$) ενώ στη θέση Θ2, κοντά στην επαφή με την υπερκείμενη

μάργα, η αντοχή είναι περίπου 8MPa. Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη του γύψου κυμαίνεται από 14MPa-59MPa. Για χρήση στο Roclab επιλέχθηκαν ως χαρακτηριστικές τιμές σ_{ci} τα 20MPa για τον ασβεστορρουδίτη και 30MPa για τον γύψο.

Πίνακας 3.4. Δεδομένα δοκιμών σημειακής φόρτισης σε δείγματα ασβεστορρουδίτη και γύψου.

Θέση	Δείγμα	Πέτρωμα	D_e (mm)	I_s (MPa) $=N/D_e^2$	I_{s50} (MPa) $=I_s(D_e/50)^{0.45}$	σ_{ci50} (MPa) $=K \times I_{s50}$	Μέσο σ_{ci50} (MPa)
Θ2	Θ2.1	ασβεστορρουδίτης	52.2	0.35	0.35	8.4	7.8
	Θ2.2	ασβεστορρουδίτης	52.7	0.29	0.29	7.1	
Θ4	Θ4.1	ασβεστορρουδίτης	67.2	1.43	1.63	39.2	59.4
	Θ4.2	ασβεστορρουδίτης	45.8	3.45	3.31	79.5	
Θ5	Θ5.1	ασβεστορρουδίτης	58.0	0.43	0.45	10.9	16.3
	Θ5.2	ασβεστορρουδίτης	53.2	0.34	0.35	8.5	
	Θ5.3	ασβεστορρουδίτης	47.0	0.88	0.85	20.5	
	Θ5.4	ασβεστορρουδίτης	47.2	1.00	0.97	23.3	
	Θ5.5	ασβεστορρουδίτης	46.6	0.71	0.69	16.5	
	Θ5.6	ασβεστορρουδίτης	51.4	0.76	0.77	18.4	
Θ7	Θ7.1	ασβεστορρουδίτης	31.8	0.76	0.62	14.9	13.3
	Θ7.2	ασβεστορρουδίτης	41.6	0.48	0.44	10.6	
	Θ7.3	ασβεστορρουδίτης	37.3	0.60	0.52	12.6	
	Θ7.4	ασβεστορρουδίτης	44.3	0.63	0.59	14.2	
	Θ7.5	ασβεστορρουδίτης	40.9	0.65	0.59	14.2	
Θ8	Θ8.1	γύψος	47.8	1.14	1.11	26.7	26.8
	Θ8.2	γύψος	49.6	1.57	1.56	37.5	
	Θ8.3	γύψος	62.8	0.61	0.68	16.3	
Θ9	Θ9.1	γύψος	46.0	0.60	0.58	14.0	36.3
	Θ9.2	γύψος	33.1	2.94	2.44	58.6	
Θ12	Θ12.1	γύψος	36.1	0.85	0.74	17.7	17.7

3.4.2 Βραχόμαζα ασβεστορρουδίτη

Ο ασβεστορρουδίτης στη θέση Θ2 εντοπίστηκε αρκετά διαβρωμένος (Σχήμα 3.20), ενώ στη Θ3 αναγνωρίστηκε μια ζώνη μετάβασης από τη μάργα στον ασβεστορρουδίτη (Σχήμα 3.21).



Σχήμα 3.20. Ασβεστορρουδίτης στη θέση Θ2.



Σχήμα 3.21. Ασβεστορρουδίτης στη θέση Θ3.



Σχήμα 3.22. Ασβεστορρουδίτης στη θέση Θ4.



Σχήμα 3.23. Ασβεστορρουδίτης στη θέση Θ5.



Σχ. 3.24. Ασβεστορρουδίτης στη θέση Θ6. Σχ. 3.25. Ασβεστορρουδίτης στη θέση Θ7.

Στην θέση Θ4 παρατηρείται η κλασική μορφή ασβεστορρουδίτη, πλήρως ασβεστοποιημένου και με τις κροκάλες να είναι εμφανείς (Σχήμα 3.22). Στις θέσεις Θ5-7 ο ασβεστορρουδίτης ήταν συμπαγής (Σχήματα 3.23, 3.24 και 3.25). Παρατηρήθηκαν επίσης κάποιες μαργοειδείς στρώσεις οι οποίες είναι σκληρές και δεν ήταν ίδιας φύσεως με το υπερκείμενο στρώμα μάργας σχηματισμού Λευκωσίας, όντας πιο ασβεστούχες. Κατά συνέπεια, οι παράμετροι αντοχής των μαργοειδών ενδιαστρώσεων του ασβεστορρουδίτη αναμένεται να είναι μεγαλύτερες από της υπερκείμενης μάργας σχηματισμού Λευκωσίας.

Rock Type: Flysch		GSI Selection: 43		SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES				
COMPOSITION AND STRUCTURE				VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
A. Thick bedded, very blocky sandstone <i>The effect of pelitic coatings on the bedding planes is minimized by the confinement of the rock mass. In shallow tunnels or slopes these bedding planes may cause structurally controlled instability.</i>				70	A			
B. Sandstone with thin inter-layers of siltstone C. Sandstone and siltstone in similar amounts D. Siltstone or silty shale with sandstone layers E. Weak siltstone or clayey shale with sandstone layers				50	E 43	C	D	E
C, D, E and G - may be more or less folded than illustrated but this does not change the strength. Tectonic deformation, faulting and loss of continuity moves these categories to F and H.				30			F	
G. Undisturbed silty or clayey shale with or without a few very thin sandstone layers H. Tectonically deformed silty or clayey shale forming a chaotic structure with pockets of clay. Thin layers of sandstone are transformed into small rock pieces.				20		G		H 10

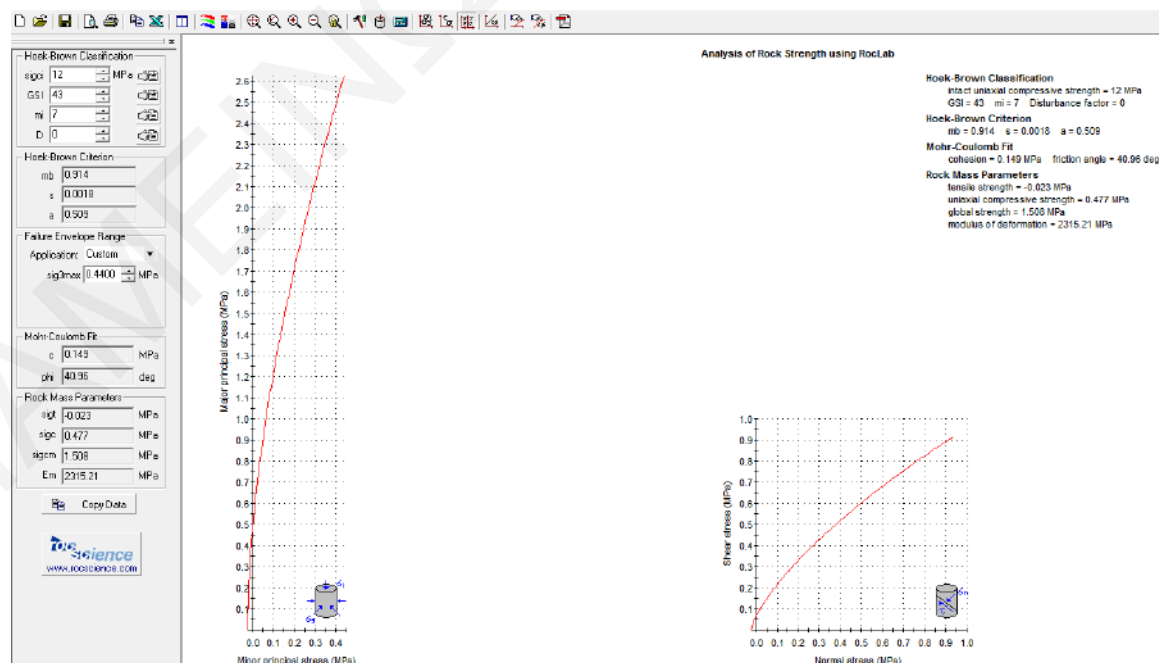
Σχήμα 3.26. Εκτίμηση του δείκτη GSI για τη βραχώμαζα ασβεστορρουδίτη (Marinos & Hoek, 2001).

Λόγω των ενδιαστρώσεων μάργας, θα χρησιμοποιηθεί το διάγραμμα GSI για ετερογενείς βραχώμαζες (Σχήμα 3.26). Οι ενδιαστρώσεις είναι σχετικά λεπτές και η δομή του ασβεστορροδίτη εκτιμάται συντηρητικά μεταξύ των κατηγοριών B (κυρίως σκληρό πέτρωμα με κάποιες λεπτές στρώσεις μαλακού πετρώματος) και C (ίσα πάχη πάγκων σκληρού και μαλακού πετρώματος). Επιλέχθηκε GSI ίσο με 43.

Λόγω της συμμετοχής ενός σκληρού πετρώματος (ασβεστορροδίτης) και ενός μαλακού πετρώματος (μάργα) στη βραχώμαζα είναι απαραίτητο να υπολογιστεί ένας βεβαρημένος μέσος όρος της σ_{ci} που να αντιπροσωπεύει και τα δυο είδη πετρωμάτων. Η συμμετοχή του ασβεστορροδίτη εκτιμήθηκε στο 70%, ενώ της μάργας στο 30%. Η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη των ενδιαστρώσεων μάργας θεωρήθηκε ίση με 2MPa, ελαφρώς χαμηλότερη από αυτή των επίσης πολύ ασβεστούχων αλλά πολύ παλαιότερων (Παλαιοκαινικών) μαργών του σχηματισμού Λευκάρων (Λουκίδης et al., 2014). Θεωρώντας συντηρητικά κατηγορία ετερογενούς βραχωμάζας C για σκοπούς επιλογής συντελεστών βάρους (w_A, w_B, P_A, P_B), προκύπτει:

$$\sigma_{ci} = P_A * w_A * \sigma_{ci}^{(A)} + P_B * w_B * \sigma_{ci}^{(B)} = 0.7 * 0.8 * 20 + 0.3 * 1 * 2 = 11.8MPa$$

Συνεπώς το ισοδύναμο σ_{ci} επιλέχθηκε ίσο με 12MPa. Το m_i για τον ασβεστορροδίτη τέθηκε ίσο με 7, τιμή που ισχύει για συγγενή μαλακά πετρώματα όπως κρητίδες και μάργες (Marinos & Hoek, 2000).



Σχήμα 3.27. Υπολογισμός συνοχής c και γωνίας τριβής ϕ της βραχώμαζας ασβεστορροδίτη στο πρόγραμμα Roclab.

Με βάση αυτά τα δεδομένα, από το Roclab (Σχήμα 3.27) προκύπτει συνοχή ίση με 0.15MPa (150kPa) και γωνία τριβής 41°.

3.4.3 Βραχόμαζα γύψου

Η επιφανειακή εμφάνιση του γύψου εξετάστηκε σε πέντε θέσεις (Θ8-Θ12). Στις θέσεις Θ8 και Θ9, (Σχήματα 3.28 και 3.29), ο γύψος είναι συμπαγής και σκληρός, και δεν παρατηρήθηκαν καρστικά κενά που μπορούν να δημιουργήσουν αστοχία και να προκαλέσουν την εκδήλωση κατολίσθησης. Στην θέση Θ10 (Σχήμα 3.30) εντοπίστηκε μια μαργοειδής ενδιάστρωση, αν και στην βιβλιογραφία δεν υπάρχει σχετική αναφορά.



Σχήμα 3.28. Γύψος στη θέση Θ8.



Σχήμα 3.29. Γύψος στη θέση Θ9.



Σχήμα 3.30. Γύψος στη θέση δειγματοληψίας Θ10.

Στην θέση Θ11 (Σχήμα 3.31) ο γύψος εμφανίζει διαρρήξεις, οι οποίες όμως αδυνατούν να καταστήσουν τη βραχώμαζα τόσο ασθενή ώστε να συμμετέχει στην μετακίνηση ενός πρανούς μικρής κλίσεως όπως της περιοχής των Λιμνών. Στην θέση Θ12 (Σχήμα 3.32) παρατηρούνται διαβρώσεις και κενά διάλυσης μικρής κλίμακος στον γύψο, που όμως δεν είναι της κλίμακος που να προκαλούν ανησυχία (όπως π.χ. μεγάλα έγκοιλα ή άλλες καρστικές μορφές).









Σχήμα 3.31. Γύψος στη θέση δειγματοληψίας Θ11.

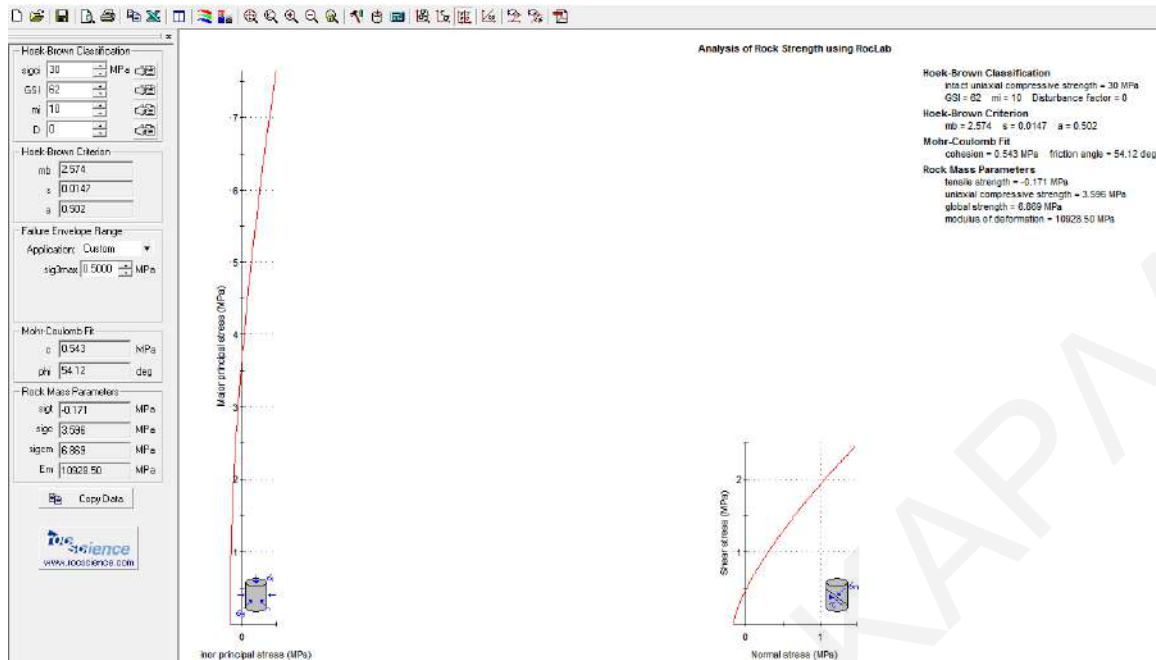


Σχήμα 3.32. Γύψος στη θέση δειγματοληψίας Θ12.

Εξετάζοντας τη δομή της βραχώμαζας προέκυψε ως γενικό συμπέρασμα ότι η βραχώμαζα γύψου της περιοχής μελέτης παρουσιάζει στρωσιγένεια και είναι αρκετά συμπαγής με αραιές διακλάσεις εγκάρσια στις επιφάνειες διάστρωσης, οι οποίες είναι λείες και υγιείς. Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά, επιλέχθηκε GSI ίσο με 62 (Σχήμα 3.33). Το m_i για τον γύψο τέθηκε ίσο με 10. Από το γράφημα του Σχήματος 3.34 προκύπτει συνοχή ίση με 0.540MPa (540kPa) και γωνία τριβής 54° . Οι τιμές των παραμέτρων αντοχής της βραχώμαζας γύψου είναι εξαιρετικά μεγάλες και είναι σίγουρο ότι η επιφάνεια ολίσθησης δεν εισέρχεται σε αυτό το στρώμα. Δηλαδή μπορεί να θεωρηθεί ότι ο γύψος αποτελεί το βραχώδες στέρεο υπόβαθρο της περιοχής μελέτης.

Rock Type: <input type="text" value="General"/>		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
GSI Selection: <input type="text" value="62"/> <input type="button" value="OK"/>						
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	62	N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets		70			
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40		
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				30	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes				20	
					10	
		N/A	N/A			

Σχήμα 3.33. Γενικό διάγραμμα GSI (Marinos & Hoek, 2000).



Σχήμα 3.34. Υπολογισμός συνοχής c και γωνίας τριβής ϕ της βραχώμαζας γύψου στο πρόγραμμα Roclab.

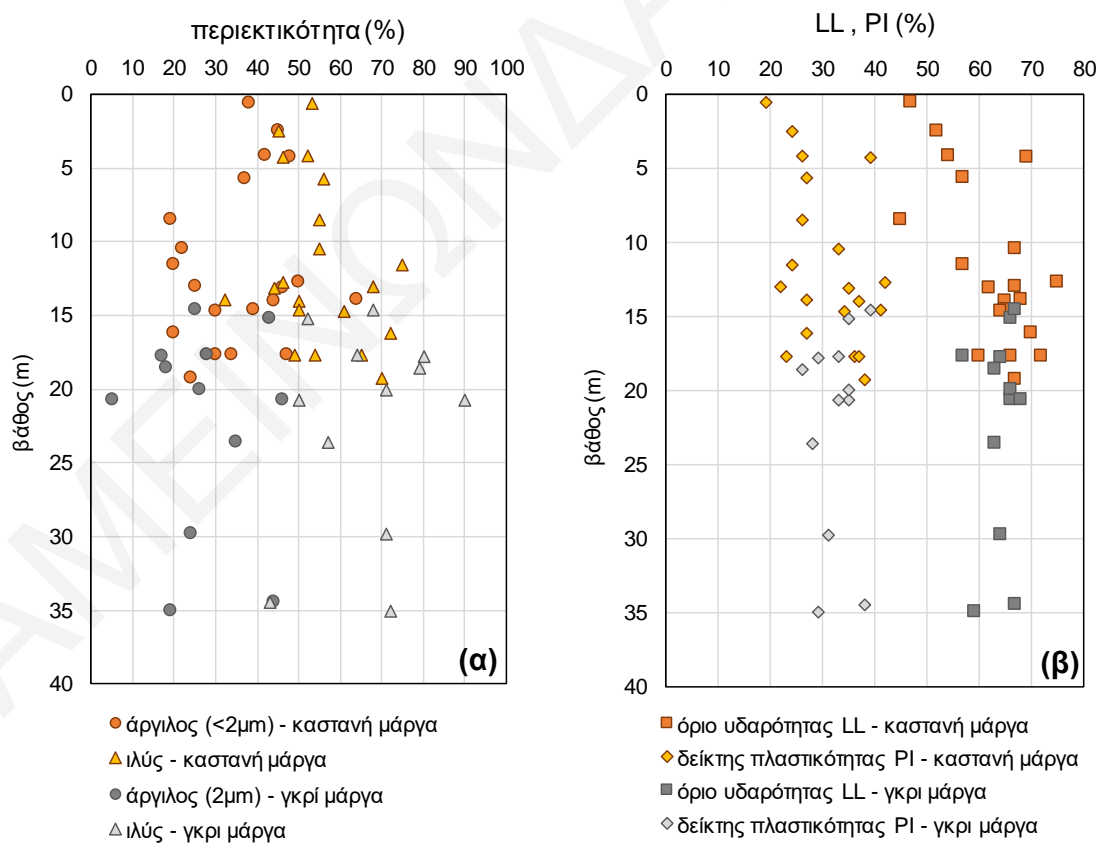
3.4.4 Μάργα σχηματισμού Λευκωσίας

Ο γεωλογικός σχηματισμός Λευκωσίας είναι εποχής Πλειόκαινου και δεν εμφανίζει βραχώμαζα με ξεκάθαρη δομή. Όντας «μετα-αλπικός» σχηματισμός, δεν μπορεί να γίνει χρήση του συστήματος GSI για τον προσδιορισμό ισοδύναμων παραμέτρων αντοχής, και η μάργα χρήζει μεταχείρισης ως ένα σκληρό αργιλικό έδαφος. Η εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής για την μάργα σχηματισμού Λευκωσίας έγινε με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία σε ότι αφορά δεδομένα από τριαξονικές δοκιμές (για την «μέγιστη» διατμητική αντοχή) και δοκιμές δακτυλιοειδούς διάτμησης (για την παραμένουσα αντοχή) σε αργιλικούς ημίβραχους του Κυπριακού χώρου.

Η βάση ψηφιακών γεωγραφικών δεδομένων του Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης (<https://gsd.maps.arcgis.com/apps/View/index.html?appid=e6f54157fe8640cc853df09bf2e75dd7>) περιλαμβάνει εντός της περιοχής της παλαιοκατολίσθησης 15 δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, οι οποίες ανορύχθηκαν από το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης (ΤΓΕ) κατά την περίοδο 2013-2018 (Σχήμα 3.35). Για 10 από αυτές, υπάρχουν εργαστηριακά δεδομένα για τη μάργα Λευκωσίας σε ότι αφορά κοκκομετρία και όρια Atterberg, που αποτελούν φυσικές ιδιότητες από τις οποίες εξαρτάται έντονα η παραμένουσα γωνία τριβής. Τα εργαστηριακά δεδομένα φαίνονται στα Σχήματα 3.36α και 3.36β.



Σχήμα 3.35. Θέσεις δειματοληπτικών γεωτρήσεων Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης.

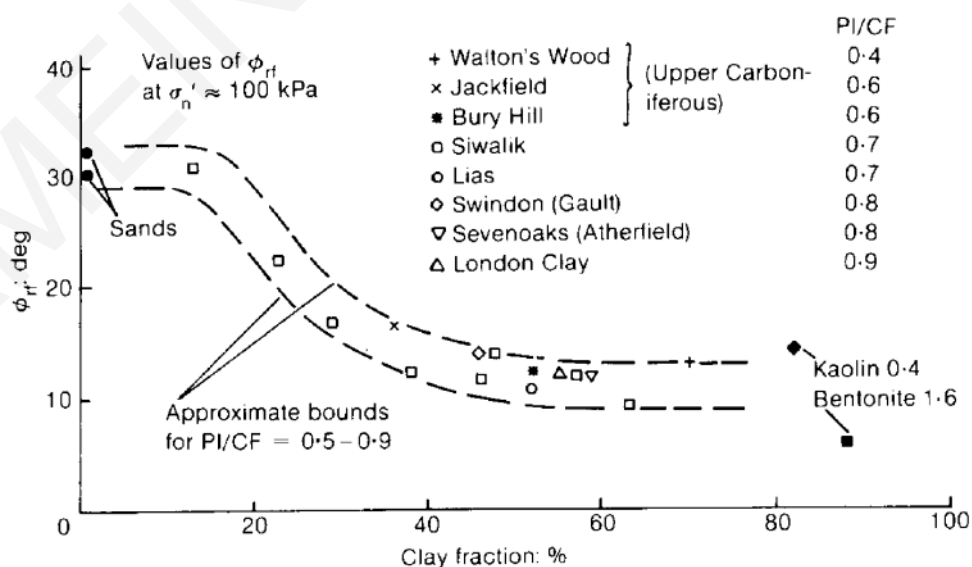


Σχήμα 3.36. Εργαστηριακά δεδομένα από δειματοληπτικές γεωτρήσεις του Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης: α) περιεκτικότητα σε άργιλο και ιλύ, β) όριο υδαρότητας και δείκτης πλαστικότητας.

Παρατηρούμε ότι η μάργα του γεωλογικού σχηματισμού Λευκωσίας αποτελείται από δυο ενότητες, την καστανή μάργα και την υποκείμενη γκρι μάργα (όπως συμβαίνει και στην περιοχή της πόλεως της Λευκωσίας βορείως της οροσειράς του Τροόδους). Η μετάβαση από την καστανή μάργα στην γκρι μάργα γίνεται στα 15m-20m βάθος. Η πλαστικότητα της καστανής μάργας αυξάνεται με το βάθος, με το LL να φτάνει στα 60-70 και το PI στα 30-40, και να διατηρείται στα ίδια επίπεδα εντός του στρώματος της γκρι μάργας. Η περιεκτικότητα σε άργιλο και για τις δυο μάργες γενικά κυμαίνεται μεταξύ 20% και 50%. Ο ορίζοντας καστανής μάργας γύρω από τα 15m βάθος (13m-18m) εμφανίζεται να έχει ελαφρώς πιο αυξημένη πλαστικότητα και περιεκτικότητα σε άργιλο, ενώ από τα 8m έως τα 13m η μάργα είναι σχετικά μικρής πλαστικότητας λόγω του ότι είναι πιο αμμούχα. Η γκρι μάργα έχει οριζόντες που είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε άργιλο και άλλους όπου φτάνει το 40-45%. Πρέπει να σημειωθεί ότι εργαστηριακά δεδομένα υπάρχουν μόνο έως τα 35m. Εντούτοις, οι στρωματογραφικές στήλες των γεωτρήσεων δείχνουν ότι η γκρι μάργα εκτείνεται πέραν των 42m βάθος.

Παραμένουσα διατμητική αντοχή από υπάρχουσες εμπειρικές συσχετίσεις

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω τιμές φυσικών ιδιοτήτων της μάργας επιχειρείται εδώ η εκτίμηση της παραμένουσας γωνίας τριβής ϕ_r με βάση εμπειρικές συσχετίσεις από τη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία. Ο Skempton (1985) παρουσίασε ένα διάγραμμα συσχέτισης της ϕ_r με το ποσοστό αργλικού κλάσματος (clay fraction: CF) οριζόμενο ως μέγεθος κόκκου $<2\mu\text{m}$ (Σχήμα 3.37).



Σχήμα 3.37. Διάγραμμα συσχέτισης ϕ_r με περιεκτικότητα σε άργιλο του Skempton (1985).

Πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή της τέμνουσας ϕ_R (δηλ. θεωρώντας ότι η αντίστοιχη παραμένουσα συνοχή είναι μηδενική) είναι μια φθίνουσα συνάρτηση της ορθής ενεργού τάσης σ'_n . Οι τιμές του διαγράμματος Skempton (1985) ισχύουν για σ'_n της τάξεως των 100kPa ($\phi_{R,100kPa}$). Η καμπύλη του κάτω ορίου του Σχήματος 3.37 μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση

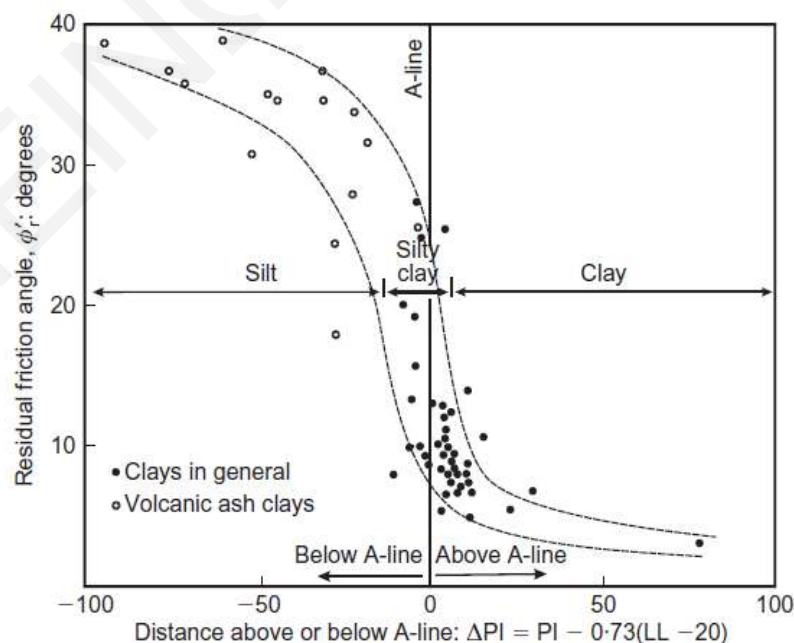
$$\phi_{R,100kPa} = \frac{20}{(1 + \exp(0.43 \times CF - 6.84))^{0.2}} + 8.84 \quad (\text{Εξ. 3.1}\alpha)$$

ενώ η καμπύλη του άνω ορίου από τη σχέση

$$\phi_{R,100kPa} = \frac{20}{(1 + \exp(0.43 \times CF - 7.8))^{0.2}} + 13 \quad (\text{Εξ. 3.1}\beta)$$

όπου CF είναι η περιεκτικότητα σε άργιλο (ως ποσοστό %) και η ϕ_R σε μοίρες ($^\circ$). Η εξαγωγή των παραπάνω σχέσεων έγινε μέσω μη-γραμμικής παρεμβολής με βάση τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων και χρήση του εργαλείου Solver του MS Excel.

Ο Wesley (2003) πρότεινε μια εμπειρική συσχέτιση του ϕ_r (Σχήμα 3.38) με την απόσταση από την A-line στο διάγραμμα πλαστικότητας Casagrande, η οποία μπορεί να ποσοτικοποιηθεί από την παράμετρο ΔPI ($= PI - 0.73(LL - 20)$).



Σχήμα 3.38. Διάγραμμα συσχέτισης ϕ_r του Wesley (2003).

Μέσω μη-γραμμικής παρεμβολής με βάση τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων και χρήση του εργαλείου Solver του MS Excel, προέκυψε η παρακάτω σχέση που αναπαριστά τη μέση καμπύλη των δεδομένων του Σχήματος 3.38 στο διάστημα ΔPI από -15 έως 50:

$$\phi_r = \frac{1.93}{0.034 + \exp(0.1 \times \Delta PI - 1.67)} + 3.84 \quad (\text{Εξ. 3.2})$$

όπου ϕ_r σε μοίρες ($^\circ$).

Η πλειοψηφία των δεδομένων αργίλου που χρησιμοποίησε ο Wesley (2003) προέρχεται από τη μελέτη των Lupini et al. (1981), όπου οι τιμές ϕ_r δεν είναι τέμνουσες αλλά συνδυάζονται με μια μη μηδενική τιμή παραμένουσας συνοχής ($c_r \neq 0$). Οι τιμές αυτές μπορεί να μετατραπούν σε τέμνουσες ϕ_R (αντιστοιχούσες σε $c_R = 0$) χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$c_r + \sigma'_n \times \tan \phi_r = \sigma'_n \times \tan \phi_R \Rightarrow \phi_R = \arctan \left(\frac{c_r}{\sigma'_n} + \tan \phi_r \right) \quad (\text{Εξ. 3.3})$$

Η ϕ_R είναι πάντα μεγαλύτερη της ϕ_r και η διαφορά τους μεγαλώνει όσο μεγαλύτερη είναι c_r και όσο μικρότερη είναι η σ'_n . Εφαρμόζοντας την εξίσωση 3.3 στα δεδομένα των Lupini et al. (1981), προέκυψαν τιμές της ϕ_R για σ'_n από 50kPa έως 500kPa και κατ' επέκταση το κατά πόσο ($\Delta\phi_R$) πρέπει να αυξηθεί η ϕ_r για να προκύψει η ϕ_R

$$\phi_R = \phi_r + \Delta\phi_R \quad (\text{Εξ. 3.4})$$

Οι μέσες τιμές $\Delta\phi_R$ από όλες τις υπερστερεοποιημένες αργίλους, μάργες, πηλίτες και σχιστές αργίλους της βάσης δεδομένων των Lupini et al. (1981) συναρτήσκει της σ'_n υποβλήθηκαν σε μη-γραμμική παρεμβολή με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιώντας το Excel solver, και προέκυψε η παρακάτω συσχέτιση:

$$\Delta\phi_R = \frac{2.1^\circ}{(\sigma'_n / p_a)} \quad (\text{Εξ. 3.5})$$

όπου p_a μια πίεση αναφοράς (για σκοπούς αδιαστατοποίησης) ίση με 100kPa στο SI.

Οι εξισώσεις 3.2, 3.4 και 3.5 επιτρέπουν την εκτίμηση της παραμένουσας αντοχής της μάργας Λευκωσίας χρησιμοποιώντας τις τιμές ορίων Atterberg που μετρήθηκαν από το

ΤΓΕ, θεωρώντας ότι η ορθή ενεργός τάση είναι περίπου ίση με την κατακόρυφη ενεργό τάση ($\sigma'_n \approx \sigma'_v$).

Για την αξιοποίηση της εξίσωσης 3.1 κατά τον ίδιο τρόπο, χρειάζεται να γίνει αναγωγή της $\phi_{R,100kPa}$ σε άλλες τιμές σ'_n . Ο Skempton (1985) παρουσίασε τιμές του λόγου $\tan(\phi_R)/\tan\phi_{R,100kPa}$ για σ'_n από 25kPa έως 150kPa. Συμπληρώνοντας με αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από τα δεδομένα των Lupini et al. (1981) που περιεγράφηκαν παραπάνω για το εύρος 150kPa-500kPa, προέκυψε μέσω παρεμβολής με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων η παρακάτω σχέση

$$\frac{\tan \phi_R}{\tan \phi_{R,100kPa}} = 9.7 \left(\frac{p_a}{\sigma'_n} \right)^{0.01} - 8.7 \quad (\text{Εξ. 3.6})$$

Παραμένουσα διατμητική αντοχή από NNI σε κυπριακά δεδομένα

Σε αυτή την υποενότητα, επιχειρείται η εκτίμηση της παραμένουσας γωνίας τριβής χρησιμοποιώντας μετρήσεις ϕ_R σε αργιλικά υλικά του κυπριακού χώρου, οι οποίες είναι δημοσιευμένες στην επιστημονική βιβλιογραφία, χρησιμοποιώντας nearest neighbor interpolation (NNI). Συγκεκριμένα, το 1986 ολοκληρώθηκαν τρεις επιστημονικές μελέτες (Northmore et al. 1986, Charalambous et al. 1986, Hobbs et al. 1986), οι οποίες διενεργήθηκαν από το British Geological Survey (BGS) σε συνεργασία με το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης (ΤΓΕ), σχετικά με τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά αργιλικών γεωυλικών της Κύπρου που εμπλέκονται συχνά σε κατολισθήσεις και άλλα γεωτεχνικά προβλήματα. Η μελέτη των Northmore et al. (1986) αφορούσε εμφανίσεις των γεωλογικών σχηματισμών Κανναβιού και Κάθηκα (mélange), καθώς και πετρώματα που ανήκουν στο σύμπλεγμα των Μαμωνιών, στην ορεινή περιοχή της επαρχίας Πάφου. Η μελέτη των Charalambous et al. (1986) αποτελεί συμπλήρωμα της πρώτης, επεκτείνοντας την έρευνα σε όλη την Κύπρο και σε νεότερους ιζηματογενείς γεωλογικούς σχηματισμούς (π.χ. μάργες σχηματισμών Λευκάρων, Πάχνας και Λευκωσίας). Η μελέτη των Hobbs et al. (1986) εστιάζει συγκεκριμένα στις μάργες του γεωλογικού σχηματισμού Λευκωσίας, όπως αυτές απαντώνται στην περιοχή της Λευκωσίας.

Στα πλαίσια αυτών των μελετών διενεργήθηκαν δοκιμές δακτυλιοειδούς διάτμησης (σε συσκευή τύπου Bromhead, από τις οποίες προκύπτουν οι τιμές της παραμένουσας γωνίας

τριβής ϕ_R (Northmore et al.: 27 δείγματα, Charalambous et al., 11 δείγματα, Hobbs et al.: 3 δείγματα). Σε αυτή τη βάση δεδομένων που προκύπτει από τις προαναφερθείσες μελέτες, προστέθηκαν δεδομένα από δοκιμές δακτυλιοειδούς διάτμησης των Μιχαηλίδης & Κύρου (1992) και Alexandris et al. (2017), που αφορούν ένα δείγμα χακί μάργας Λευκωσίας από το Πάρκο Ακαδημίας στη Λευκωσία και ένα δείγμα καστανής μάργας Λευκωσίας από το Πισσούρι (κατολίσθηση οδού Ανεξαρτησίας), αντίστοιχα. Τα παραπάνω δεδομένα παρουσιάζονται συνοπτικά σε πινακοποιημένη μορφή στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. Πρέπει να σημειωθεί ότι για ορισμένα δείγματα δακτυλιοειδούς διάτμησης στις μελέτες Northmore et al. (1986) και Charalambous et al. (1986) δεν είχαν μετρηθεί φυσικά χαρακτηριστικά (κοκκομετρική διαβάθμιση ή/και όρια Atterberg). Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι τιμές των φυσικών χαρακτηριστικών πάρθηκαν από τα δείγματα που ήταν λίγο πιο πάνω ή κάτω στην ίδια γεώτρηση ή σε μικρή οριζόντια απόσταση στην περίπτωση δειγμάτων από ερευνητικά σκάμματα.

Στην παρούσα εφαρμογή, η nearest neighbor interpolation (NNI) συνίσταται στην υιοθέτηση για κάθε ένα δείγμα των γεωτρήσεων του ΤΓΕ στη περιοχή Λίμνες Πισσουρίου (Σχήμα 3.36) της τιμής ϕ_R του δείγματος της βάσης δεδομένων που βρίσκεται πλησιέστερα στο εξεταζόμενο δείγμα σε ότι αφορά τις τιμές ποσοστού αργίλου CF, ορίου υδαρότητας LL και δείκτη πλαστικότητας PI. Συγκεκριμένα, για κάθε ένα δείγμα του Σχήματος 3.36 υπολογίστηκε η κανονικοποιημένη «απόσταση» D από τα δείγματα της βάσης δεδομένων με βάση τον παρακάτω τύπο:

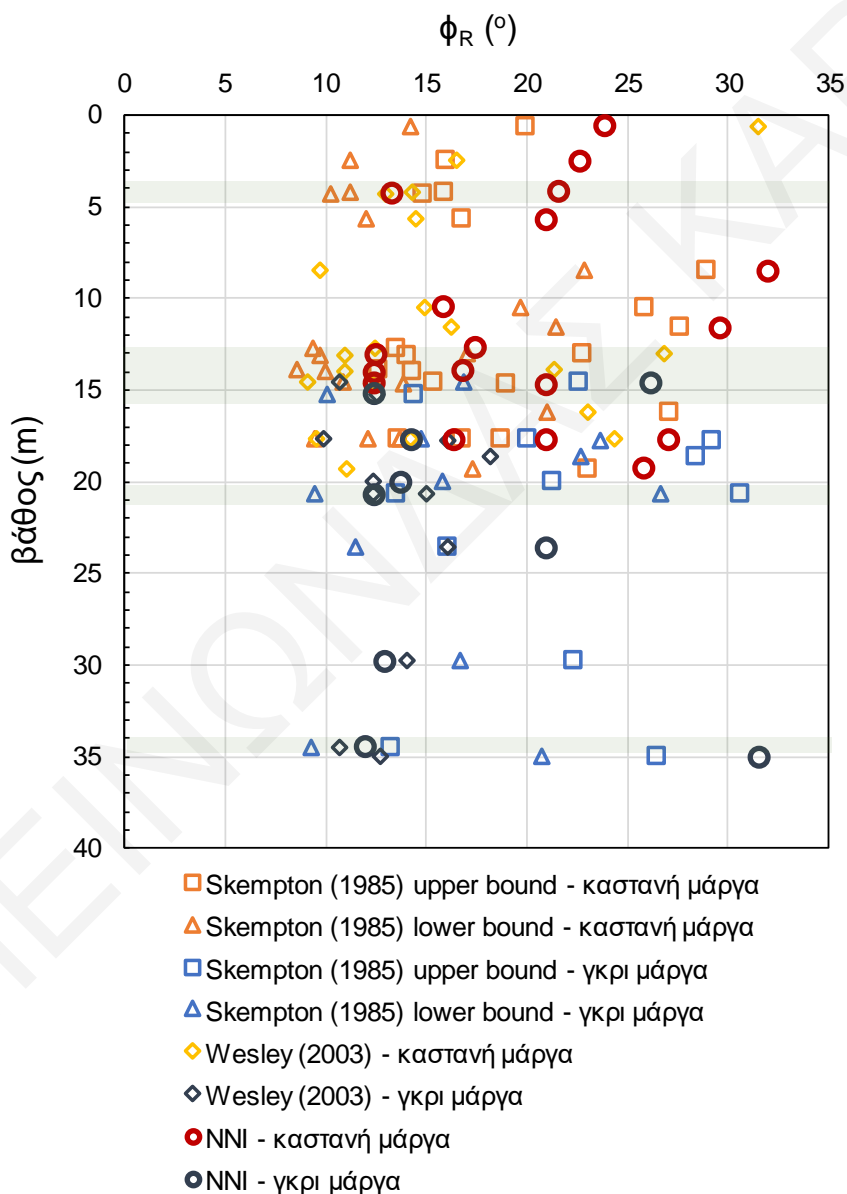
$$D = \sqrt{\frac{(CF_s - CF_d)^2}{(CF_s + CF_d)^2} + \frac{(LL_s - LL_d)^2}{(LL_s + LL_d)^2} + \frac{(PI_s - PI_d)^2}{(PI_s + PI_d)^2}} \quad (\text{Εξ 3.7})$$

όπου ο δείκτης s αναφέρεται στο δείγμα του οποίου η ϕ_R πρόκειται να εκτιμηθεί και ο δείκτης d αναφέρεται στο εκάστοτε δείγμα της βάσης δεδομένων. Το ποσοστό άμμου επιλέχθηκε να μη συμπεριληφθεί στο D δεδομένου ότι οι υπάρχουσες εμπειρικές συσχετίσεις δεν το λαμβάνουν υπόψη.

Αφού υπολογιστούν τιμές D για όλα τα δείγματα της βάσης δεδομένων, στη συνέχεια επιλέγεται η τιμή ϕ_R του δείγματος της βάσης δεδομένων στην οποία αντιστοιχεί η ελάχιστη υπολογισμένη «απόσταση» D_{\min} . Στην περίπτωση που η D_{\min} για ένα δείγμα του Σχήματος 3.36 προκύπτει μεγαλύτερη από 0.15, η τιμή απορρίπτεται και θεωρείται ότι δεν μπορεί να εκτιμηθεί η ϕ_R με τη μέθοδο nearest neighbor. Η οριακή τιμή 0.15 αντιστοιχεί

χονδρικά σε 12%-19% μέσο όρο ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ τιμών CF_d , LL_d , PI_d και CF_s , LL_s , PI_s , με μέγιστη δυνατή ποσοστιαία διαφορά 26%-35% σε μια από τις παραμέτρους αν τυγχάνει να υπάρχει πλήρης ταύτιση τιμών στις άλλες δυο παραμέτρους.

Οι εκτιμήσεις παραμένουσας γωνίας τριβής της μάργας σχηματισμού Λευκωσίας με βάση τις συσχετίσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας και της εφαρμογής NNI σε πειραματικά δεδομένα σε αργιλικά υλικά του κυπριακού χώρου δίνονται στο Σχήμα 3.39.



Σχήμα 3.39. Εκτιμήσεις της παραμένουσας γωνίας τριβής ϕ_R της μάργας σχηματισμού Λευκωσίας με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία και δεδομένα από αργιλικά υλικά της Κύπρου.

Οι εκτιμήσεις της ϕ_R με βάση τις διάφορες πηγές δεν συμφωνούν μεταξύ τους σε πολλές περιπτώσεις, με τη διασπορά τιμών να είναι σημαντική. Εντούτοις, υπάρχουν στάθμες (ορίζοντες) όπου υπάρχει συμφωνία (με τις τιμές βάσει Wesley (2003) και NNI να βρίσκονται μεταξύ των ορίων Skempton (1985)) στο ότι η τιμή της ϕ_R μπορεί να είναι ιδιαίτερα χαμηλή, από 8° έως 13° , με πιο πιθανή τιμή εντός του διαστήματος 10° - 11° . Αυτοί οι ορίζοντες αδυναμίας, οι οποίοι απαντώνται και στην καστανή και στη γκρι μάργα, δείχνονται με πράσινη σκίαση στο Σχήμα 3.39 και πρόκειται για τμήματα του εδαφικού προφίλ όπου η μάργα έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε άργιλο και εμφανίζει σχετική υψηλή πλαστικότητα.

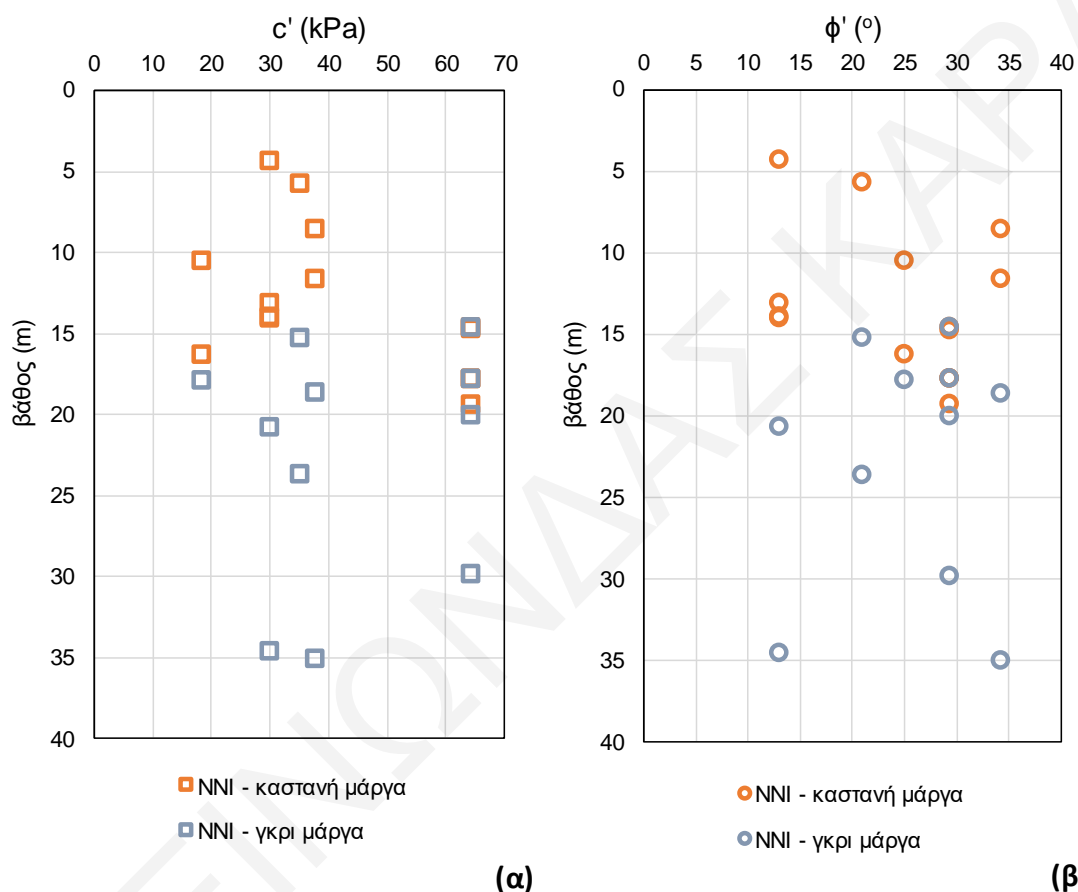
Δεδομένου ότι το αζιμούθιο κλίσης των στρωμάτων σχεδόν ταυτίζεται με τον άξονα και την κατεύθυνση της παλαιοκατολίσθησης, είναι αναμενόμενο ότι η επιφάνεια ολίσθησης ακολουθεί έναν από αυτούς τους ορίζοντες χαμηλής ϕ_R . Ενδεχομένως τέτοιοι ορίζοντες χαμηλής παραμένουσας αντοχής να βρίσκονται και στα βάθη για τα οποία δεν υπάρχουν πυκνές μετρήσεις φυσικών χαρακτηριστικών της μάργας όπως μεταξύ 22m και 34m και κάτω από τα 35m (μέχρι περίπου 47m βάθος όπου εκτείνεται η γκρι μάργα).

Παράμετροι αντοχής «αδιατάρακτης» μάργας (c',ϕ') από NNI σε κυπριακά δεδομένα

Η μάργα γεωλογικού σχηματισμού Λευκωσίας που βρίσκεται εκτός της προϋπάρχουσας ζώνης ολίσθησης αναμένεται να έχει (υπό μακροπρόθεσμες συνθήκες) τις ενεργές παραμέτρους αντοχής c',ϕ' που μετρώνται σε δοκιμές τριαξονικής θλίψης. Εν τη απουσία εμπειρικών συσχετίσεων στη διεθνή βιβλιογραφία για το ζεύγος (c',ϕ'), η εκτίμηση των τιμών των παραμέτρων έγινε με την αναζήτηση συγγενούς υλικού στα πειραματικά δεδομένα τριαξονικών δοκιμών CUPP (consolidated undrained με μέτρηση πίεσης πόρων) για αργιλικά γεωυλικά της Κύπρου των μελετών Northmore et al. (1986) (8 δείγματα), Μιχαηλίδης & Κύρου (1992) (2 δείγματα), Alexandris et al. (2017) (1 δείγμα) και Λαζάρου (2020) (2 δείγματα). Τα δεδομένα αυτά παρατίθενται σε πινακοποιημένη μορφή στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.

Όπως και στην περίπτωση της παραμένουσας γωνίας τριβής, η «απόσταση» D υπολογίστηκε επί τη βάση των φυσικών χαρακτηριστικών CF, LL, PI χρησιμοποιώντας της εξίσωσης (3.7). Στην περίπτωση που η ελάχιστη υπολογιζόμενη τιμή D (D_{\min}) για κάποιο δείγμα του Σχήματος 3.36 προκύπτει μεγαλύτερη από 0.16, η τιμή απορρίπτεται

και θεωρείται ότι δεν μπορούν να εκτιμηθούν (c', ϕ') με τη μέθοδο nearest neighbor. Η οριακή τιμή 0.16 αντιστοιχεί χονδρικά σε 13%-20% μέσο όρο ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ τιμών CF_d, LL_d, PI_d και CF_s, LL_{ds}, PI_s , με μέγιστη δυνατή ποσοστιαία διαφορά 28%-38% σε μια από τις παραμέτρους αν τυγχάνει να υπάρχει πλήρης ταύτιση τιμών στις άλλες δυο παραμέτρους. Οι εκτιμήσεις c' και ϕ' από την εφαρμογή της NNI παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.40.

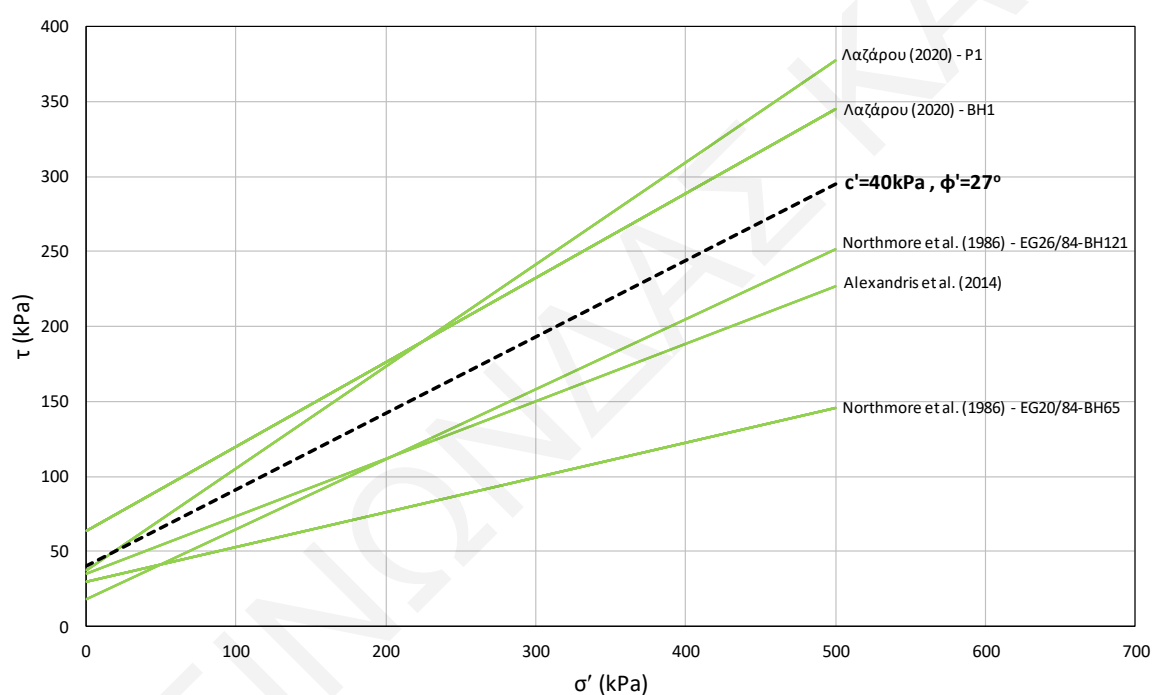


Σχήμα 3.40 Εκτιμήσεις παραμέτρων αντοχής c' και ϕ' για τη μάργα σχηματισμού Λευκωσίας με βάση NNI σε κυπριακά δεδομένα.

Τα εγγύτερα υλικά στα δείγματα μάργας της περιοχής Λίμνες Πισσουρίου προέκυψαν να είναι τα δυο δείγματα (P1 και BH1) καστανής μάργας από το νέο campus του Πανεπιστημίου Κύπρου (13 φορές), η καστανή μάργα των Alexandris et al. (2017) από την κατολίσθηση στην οδό Ανεξαρτησίας στο Πισσούρι (3 φορές), ένα δείγμα σχηματισμού Κάθηκα - mélange (EG20/84-BH65, 9 φορές) και ένα δείγμα πηλίτη σχηματισμού Κανναβιού (EG26/84-BH121, 3 φορές). Τα δυο τελευταία προκύπτουν τα

πλησιέστερα στους οριζόντες μάργας που εμφανίζουν υψηλή πλαστικότητα και υψηλό ποσοστό αργίλου.

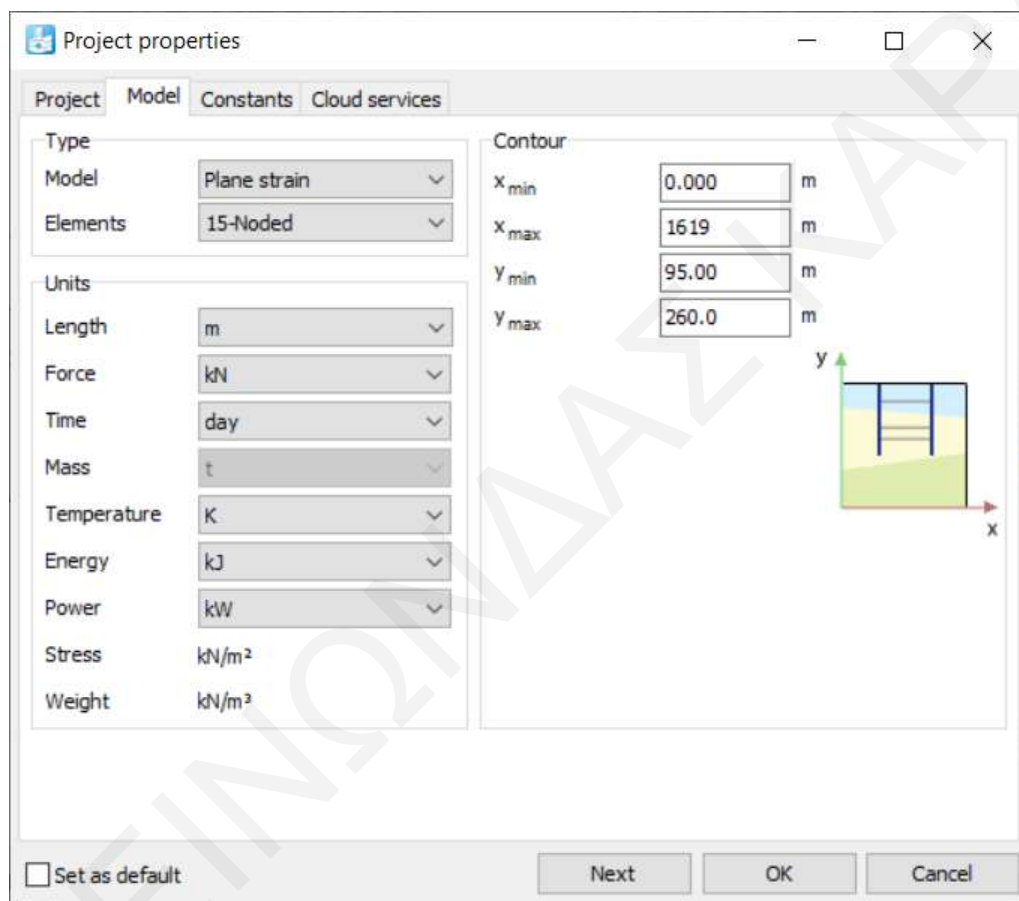
Τα τμήματα της επιφάνειας ολίσθησης της τρέχουσας αστάθειας που ενδέχεται να εμπλέξουν τις αντοχές που καθορίζουν οι c' και ϕ' αναμένεται να είναι ανοδικοί ή καθοδικοί κλάδοι που διατρέχουν όλο το πάχος της μάργας από τη βάση της επιφάνειας ολίσθησης μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια. Κατά συνέπεια, οι τιμές παραμέτρων αντοχής για την «αδιατάρακτη» μάργα επιλέγονται για εισαγωγή στο Plaxis 2D ως οι κατά προσέγγιση μέσες τιμές καθ' όλο το πάχος του σχηματισμού, και συγκεκριμένα $c'=40\text{kPa}$ και $\phi'=27^\circ$. Στο Σχήμα 3.41 γίνεται σύγκριση των αντίστοιχων περιβαλλουσών αστοχίας.



Σχήμα 3.41 Σύγκριση περιβάλλουσας για «αδιατάρακτη» μάργα στο Plaxis 2D με τις περιβάλλουσες των αργιλικών υλικών της Κύπρου με τα εγγύτερα φυσικά χαρακτηριστικά.

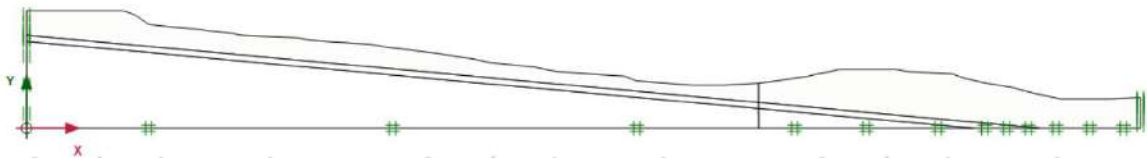
3.5 Μοντελοποίηση στο πρόγραμμα Plaxis 2D

Η μοντελοποίηση στο πρόγραμμα Plaxis 2D ξεκινάει με την καρτέλα 'model', όπου επιλέχθηκε μοντέλο προσομοίωσης 'plane strain' (επίπεδης παραμόρφωσης) και τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία 15 κόμβων, τα οποία προσφέρουν τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια στο Plaxis. Επιπλέον καθορίστηκαν οι μονάδες μέτρησης (σύστημα SI) και η έκταση της επιφάνειας εργασίας, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.42.



Σχήμα 3.42. Καθορισμός τύπου μοντέλου, τύπου στοιχείου, έκτασης επιφάνειας εργασίας και μονάδων μέτρησης.

Το επόμενο βήμα αποτελεί η εισαγωγή της γεωμετρίας της τομής (επιφάνεια εδάφους, στρωματογραφία) και ο καθορισμός των υλικών με βάση τα φυσικά και μηχανικά τους χαρακτηριστικά. Η διαδικασία ξεκινά από το μενού 'Structures' με την εισαγωγή δεδομένων που σχετίζονται με την μορφολογία της επιφάνειας του εδάφους και συνεχίζεται με τον διαχωρισμό του υπεδάφους στα στρώματα που το αποτελούν, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.43.



Σχήμα 3.43. Τομή ανάλυσης της κατολίσθησης στο πρόγραμμα Plaxis 2D.

Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η κατακόρυφη γραμμή εντός του δεξιού τμήματος του προσομοιώματος (Σχήμα 3.43) δεν αποτελεί ρήγμα ή κάποια άλλη γεωλογική δομή, αλλά είναι ένα εσωτερικό σύνορο που προέκυψε από προέκταση προς τα κατάντη μιας αρχικής εκδοχής του μοντέλου.

Ακολούθως καταχωρήθηκαν οι ιδιότητες των υλικών (μάργα, μάργα στη ζώνη ολίσθησης με παραμένουσα αντοχή, ασβεστορρουδίτης και γύψος). Ως material model επιλέχθηκε το Mohr-Coulomb υπό συνθήκες πλήρους στράγγισης (drained), δηλαδή εξετάζοντας μακροπρόθεσμες συνθήκες αφού η κατολίσθηση είναι αργή και αφορά μια δύσκαμπτη (υπερστερεοποιημένη) άργιλο (μάργα σχηματισμού Λευκωσίας). Οι κυριότερες ιδιότητες των υλικών τύπου Mohr-Coulomb είναι η συνοχή (c) και η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ), καθώς και η γωνία διασταλτικότητας (ψ). Η γωνία διασταλτικότητας για τη μάργα εκτός επιφάνειας ολίσθησης τέθηκε ίση με 5° αφού πρόκειται για μια υπερστερεοποιημένη άργιλο, ενώ στη ζώνη ολίσθησης όπου η μάργα έχει την παραμένουσα (residual) αντοχή της η γωνία διασταλτικότητας ψ τίθεται ίση με 0. Η παραμένουσα συνοχή κανονικά θα έπρεπε να τεθεί ίση με 0, αλλά για λόγους αριθμητικής ευστάθειας των αλγορίθμων επίλυσης τέθηκε μια μικρή τιμή ίση με 0.1kPa, η οποία έχει αμελητέα επίδραση στον υπολογιζόμενο συντελεστή ασφαλείας.

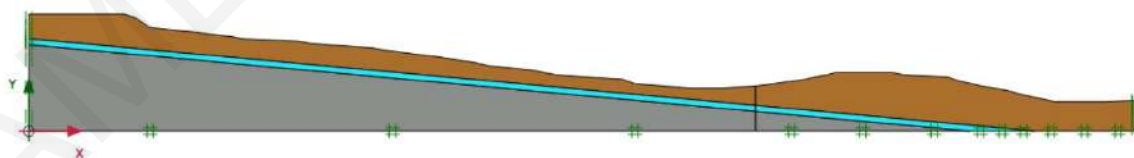
Στον ασβεστορρουδίτη το ψ αναμένεται να είναι μεγαλύτερο από μηδέν, αλλά επειδή υπάρχει η μικρή πιθανότητα η επιφάνεια ολίσθησης της παλαιοκατολίθησης να εμπλέκει τον ασβεστορρουδίτη, γίνεται επίσης θεώρηση $\psi=0$. Για τη βραχώμαζα γύψου, η οποία είναι αρκετά συμπαγής, η γωνία διαστολικότητας θεωρήθηκε ίση με 25° , δηλαδή ελαφρώς μικρότερη από το μισό της γωνίας τριβής της βραχώμαζας. Τέλος, οι ελαστικές παράμετροι, δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας του Young (E) και ο λόγος Poisson (ν), είναι ήσσονος σημασίας στις αναλύσεις ευστάθειας πρανών, αφού δεν επηρεάζουν τον υπολογιζόμενο συντελεστή ασφαλείας. Για τη μάργα θεωρήθηκε σταθερή τιμή του μέτρου του Young E ίση με 50MPa με βάση πειραματικά αποτελέσματα (Λαζάρου, 2020) σε δείγματα από την περιοχή της Λευκωσίας. Ο λόγος του Poisson για τη μάργα θεωρήθηκε

ίσος με 0.3 υπό στραγγιζόμενες (μακροπρόθεσμες) συνθήκες. Στον Πίνακα 3.5 παρατίθενται συγκεντρωτικά οι τιμές παραμέτρων αντοχής των γεωυλικών που θεωρήθηκαν στις αναλύσεις Plaxis σύμφωνα με την Ενότητα 3.4.

Πίνακας 3.5. Παράμετροι αντοχής γεωυλικών στις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων.

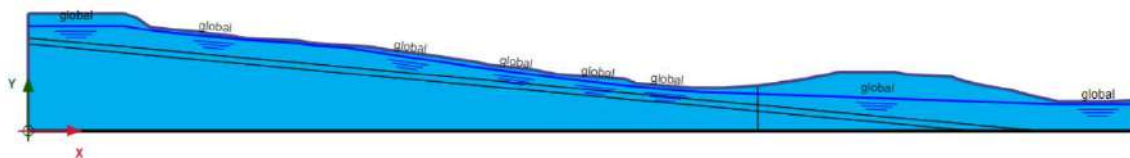
Υλικό	Ειδικό βάρος γ (kN/m ³)	Συνοχή c (kPa)	Γωνία τριβής ϕ (°)	Γωνία διαστολικότητας ψ (°)
Μάργα	19	40	27	5
Μάργα στην επιφάνεια ολίσθησης - παραμένουσα αντοχή	19	0.1	8 έως 15	0
Ασβεστορρουδίτης	21	150	41	0
Γύψος	23	540	54	25

Μετά τη δημιουργία των υλικών, κάθε ένα από αυτά ανατέθηκε στην αντίστοιχη περιοχή που καταλαμβάνει στην τομή (Σχήμα 3.44). Στη συνέχεια ορίστηκαν συνοριακές συνθήκες μέσω της εντολής ‘Standard fixities’, δηλαδή δέσμευση και των δυο βαθμών ελευθερίας στο κάτω οριζόντιο σύνορο και δέσμευση μόνο του οριζόντιου βαθμού ελευθερίας στα δυο κατακόρυφα σύνορα του μοντέλου.



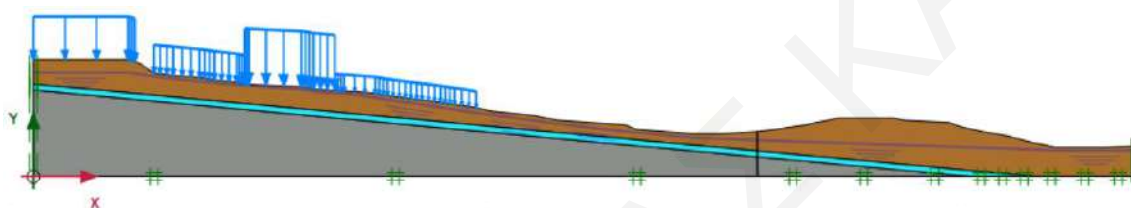
Σχήμα 3.44. Τομή στο πρόγραμμα Plaxis 2D μετά την ανάθεση του υλικού που αντιστοιχεί σε κάθε ζώνη και των συνοριακών συνθηκών.

Στο μενού ‘Flow conditions’ έγινε εισαγωγή του υδροφόρου ορίζοντα σε όλο το μήκος της τομής (Σχήμα 3.45).



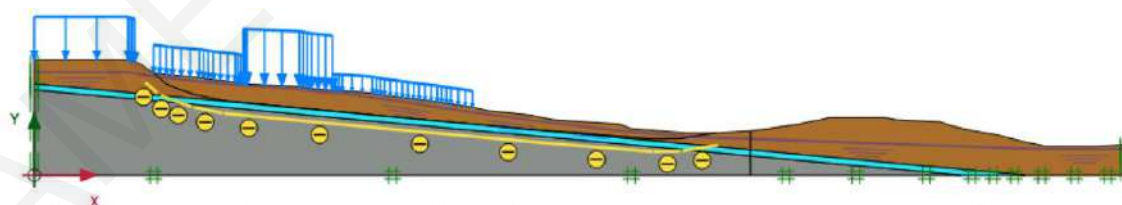
Σχήμα 3.45. Εισαγωγή υδροφόρου ορίζοντα στο μοντέλο.

Με την εντολή ‘Create line load’ στο μενού ‘Structures’ έγινε η τοποθέτηση των ισοδύναμων φορτίων των κτιριακών κατασκευών που βρίσκονται στην περιοχή μελέτης (Σχήμα 3.46).



Σχήμα 3.46. Τομή στο πρόγραμμα Plaxis 2D μετά την εισαγωγή των φορτίων των κτιριακών κατασκευών.

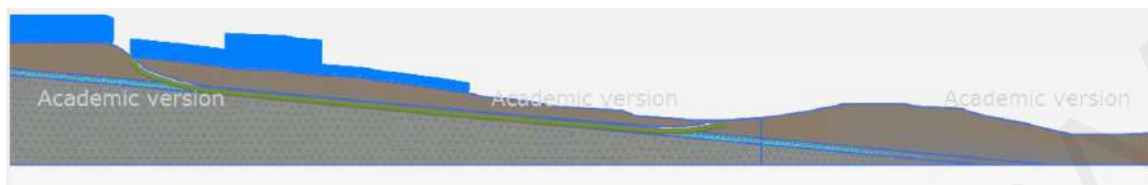
Από το μενού ‘Structures’ και με την εντολή ‘Create interface’ σχεδιάζεται η εκάστοτε δυνητική (δοκιμαστική) επιφάνεια ολίσθησης και κατόπιν της ανατίθεται το υλικό με τις παραμένουσες παραμέτρους αντοχής μάργας Λευκωσίας. Παράδειγμα του μοντέλου με σχεδιασμένη τη δυνητική επιφάνεια ολίσθησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.47.



Σχήμα 3.47. Τελική μορφή της τομής στο πρόγραμμα Plaxis 2D μετά και τη σχεδίαση της επιφάνειας ολίσθησης.

Με την ολοκλήρωση της σχεδίασης της γεωμετρίας και τον καθορισμό των υλικών των πετρωμάτων, έγινε ορισμός του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων μέσω του μενού ‘Mesh’ και της εντολής ‘Generate mesh’. Χρησιμοποιώντας επαναλαμβανόμενα την

εντολή ‘Refine mesh’ το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων έγινε επαρκώς πυκνό ώστε η ανάλυση να έχει ικανοποιητική αριθμητική ακρίβεια (Σχήμα 3.48).



Σχήμα 3.48. Παράδειγμα δικτύου πεπερασμένων στοιχείων.

Οι υπολογισμοί με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων έγιναν μέσω του μενού ‘Staged construction’, όπου δημιουργήθηκαν πέντε υπολογιστικές φάσεις. Οι υπολογισμοί εκτελέστηκαν επιλέγοντας την εντολή ‘Calculate’. Οι πέντε υπολογιστικές φάσεις που περιελάμβανε η κάθε ανάλυση είναι οι εξής:

Πρώτη φάση: Αρχικό πεδίο τάσεων

Στην αρχική αυτή φάση γίνεται εγκατάσταση του αρχικού τασικού πεδίου εντός του υπεδάφους λόγω βαρύτητας εν τη απουσία του υδροφόρου ορίζοντα. Για να γίνει αυτό, το ‘Calculation type’ που πρέπει να επιλεγεί είναι το ‘Gravity loading’.

Δεύτερη φάση: Υδροφόρος

Φάση κατά την οποία ορίζεται ο υδροφόρος ορίζοντας και γίνεται ανακατανομή τάσεων λόγω της δημιουργίας πιέσεων πόρων. Το ‘Calculation type’ που επιλέγεται είναι το ‘Plastic’.

Τρίτη φάση: Φορτία

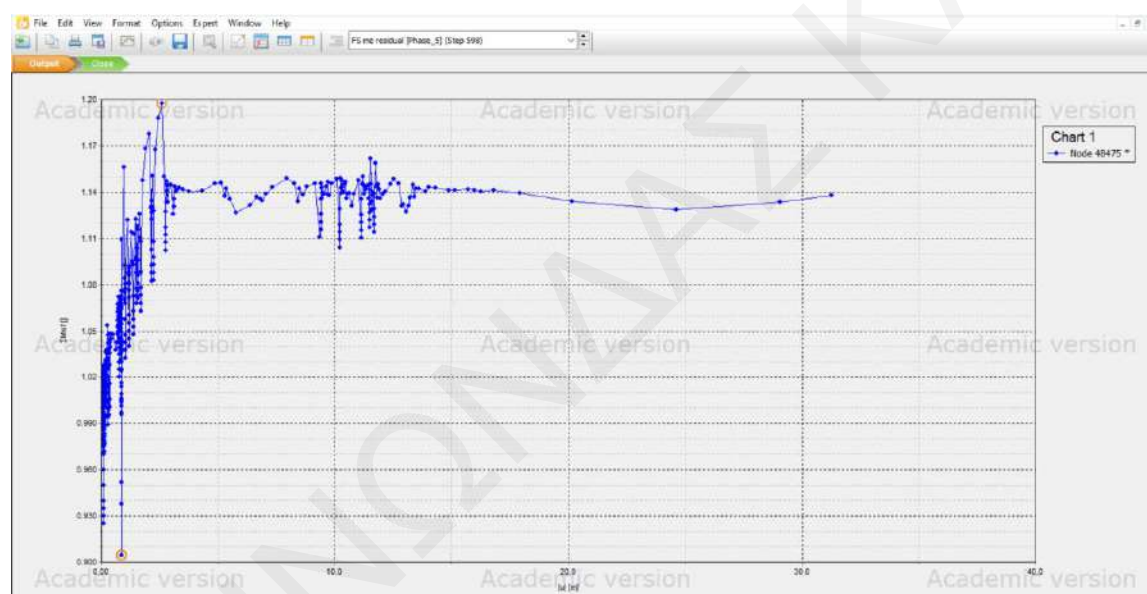
Φάση κατά την οποία επιβάλλονται τα φορτία των κτιριακών κατασκευών στην επιφάνεια του εδάφους. Το ‘Calculation type’ που επιλέγεται είναι ‘Plastic’.

Τέταρτη φάση: Ενεργοποίηση επιφάνειας ολίσθησης

Φάση κατά την οποία ενεργοποιείται η επιφάνεια ολίσθησης στο υπολογιστικό μοντέλο. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, οι τιμές των παραμέτρων αντοχής επί της επιφάνειας ολίσθησης αλλάζουν από αυτές που ισχύουν σε «αδιατάρακτο» υλικό σε τιμές παραμένουσας αντοχής, με αποτέλεσμα να γίνεται υπολογισμός μιας μικρής ανακατανομής τάσεων. Το ‘Calculation type’ που επιλέγεται είναι το ‘Plastic’.

Πέμπτη φάση: Υπολογισμός FS

Φάση κατά την οποία υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας της κατολίθησης με τη μέθοδο “strength reduction”. Η μέθοδος αυτή έγκειται στην σταδιακή μείωση της συνοχής (c) και της εφαπτομένης της γωνίας τριβής ($\tan\phi$) των υλικών με το να διαιρούνται από ένα κοινό συντελεστή (ΣMsf σύμφωνα με τον συμβολισμό του Plaxis) που αυξάνεται σταδιακά, με αποτέλεσμα την προοδευτική ανάπτυξη μετακινήσεων και παραμορφώσεων. Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας FS του πρανούς είναι η οριακή τιμή του διαιρέτη των παραμέτρων αντοχής, δηλαδή αυτή για την οποία περεταίρω αύξηση του διαιρέτη έχει ως αποτέλεσμα την εκδήλωση πολύ μεγάλων (θεωρητικά άπειρου μεγέθους) μετακινήσεων.



Σχήμα 3.49. Γράφημα εξέλιξης διαιρέτη διαμητικής αντοχής ΣMsf vs. μετατοπίσεως u .

Στο Σχήμα 3.49 δίνεται ένα παράδειγμα προοδευτικής αύξησης του διαιρέτη των διαμητικών αντοχών ΣMsf και της συνεπαγόμενης αύξησης της ολίσθησης του πρανούς από μια από τις αναλύσεις που παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο. Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας FS λαμβάνεται από το τμήμα του γραφήματος στο οποίο έπειτα από κάποιο διάστημα παύει να αυξάνεται ενώ ταυτόχρονα οι παραγόμενες αυξήσεις στη μετατόπιση είναι μεγάλες. Επιπλέον, για να είναι αξιόπιστη η τιμή του FS επιλέγεται από το τμήμα του οριζόντιου κλάδου του γραφήματος όπου το ΣMsf φαίνεται να σταθεροποιείται και να μην παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, παρατηρείται ότι κατά τα πρώτα 3m μετατόπισης η τιμή του ΣMsf

παρουσιάζει έντονες αυξομειώσεις, οι οποίες στη συνέχεια σταδιακά περιορίζονται και η καμπύλη αρχίζει να σταθεροποιείται γύρω από την τιμή 1.14 η οποία επιλέγεται ως συντελεστής ασφαλείας FS.

Τέλος, το 'Calculation type' που επιλέχθηκε σε αυτή τη φάση ήταν το 'Safety', ενώ στο 'Loading type' επιλέχθηκε 'Incremental multiplier'. Επιπρόσθετα ενεργοποιήθηκε η εντολή 'Reset Displacements to zero' ώστε να μηδενιστούν οι μετακινήσεις και οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στα προηγούμενα στάδια και να καταγράφονται μόνο οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται κατά τη διαδικασία του strength reduction.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων και τη δημιουργία του μοντέλου στο λογισμικό Plaxis 2D, εκτελέστηκαν αντίστροφες αναλύσεις (back-analyses) για τον προσδιορισμό της πλέον πιθανής γεωμετρίας της επιφάνειας ολίσθησης και παράλληλα την οριστικοποίηση της γωνίας τριβής ϕ_R της μάργας στην επιφάνεια ολίσθησης (παραμένουσα αντοχή) και του κρίσιμου ύψους του φρεάτιου ορίζοντα, πριν ξεκινήσει η μελέτη για τα απαιτούμενα μέτρα σταθεροποίησης της κατολίσθησης.

Λαμβάνοντας ως δεδομένη την τρέχουσα κατάσταση αστάθειας του εδάφους και κατά συνέπεια την εκδήλωση της κατολίσθησης, ο πραγματικός συντελεστής ασφαλείας FS θα έπρεπε να είναι ίσος με τη μονάδα. Η μέθοδος του strength reduction, την οποία εφαρμόζουν τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων για τον προσδιορισμό του FS, αποτελεί την ιδανική επιλογή για την διεξαγωγή αντίστροφων αναλύσεων διότι επιτρέπει την εξαγωγή μιας εκτίμησης των παραμέτρων αντοχής που οδηγούν σε FS=1 από κάθε μια από τις δοκιμαστικές αναλύσεις. Συγκεκριμένα, αν μια ανάλυση όπου η αντοχή του υλικού που εμπλέκεται (στην προκειμένη περίπτωση η μάργα σχηματισμού Λευκωσίας) είναι c_R και ϕ_R δίνει ως αποτέλεσμα μια οποιαδήποτε τιμή FS>1, αυτό σημαίνει ότι για να βρεθεί το πρανές σε οριακή αστάθεια στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (δηλαδή να υπάρξει ανάπτυξη πολύ μεγάλων παραμορφώσεων) οι αντοχές έχουν μειωθεί κατά την διάρκεια της ανάλυσης στις τιμές c_R/FS και $\arctan[\tan(\phi_R/FS)]$. Όμως το να βρίσκεται ένα πρανές σε οριακή αστάθεια σημαίνει εξ ορισμού ότι FS=1. Άρα κάθε ανάλυση με τη μέθοδο strength reduction ενέχει στο τέλος της τις τιμές αντοχής που αντιστοιχούν σε FS=1 ως

$$c_{R,FS=1} = \frac{c_R}{FS} \quad (\text{Εξ. 4.1})$$

$$\phi_{R,FS=1} = \arctan\left(\frac{\tan \phi_R}{FS}\right) \quad (\text{Εξ. 4.2})$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω αριθμητικών ανακριβειών, οι τιμές παραμέτρων αντοχής που προκύπτουν από τις εξισώσεις (4.1) και (4.2) αναμένεται να είναι πιο αξιόπιστες όσο ο διαιρών FS είναι πλησιέστερα στη μονάδα.

Με την παραπάνω λογική, έγινε προσδιορισμός της $\phi_{R,FS=1}$ για διάφορα πιθανά σενάρια σε ότι αφορά σημαντικούς παράγοντες οι οποίοι δεν είναι απόλυτα γνωστοί από τα δεδομένα

πεδίου, όπως η στάθμη του φρεάτιου υδροφόρου ορίζοντα, το βάθος του κυρίου τμήματος της επιφάνειας ολίσθησης, και η έξοδος της επιφάνειας ολίσθησης στον πόδα. Ως πλέον επικρατέστερα σενάρια θα προκριθούν αυτά για τα οποία η $\phi_{R,FS=1}$ προκύπτει εντός του διαστήματος 10° - 11° το οποίο συνάδει με τα ευρήματα της Ενότητας 3.4.

4.1 Επίδραση της τιμής παραμένουσας συνοχής

Σε πρώτη φάση επιλέχθηκε να γίνει διεξαγωγή αναλύσεων για τον υπολογισμό του FS χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς τιμών παραμένουσας συνοχής και παραμένουσας γωνίας τριβής της μάργας του σχηματισμού Λευκωσίας ώστε να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της υιοθέτησης στις κύριες αναλύσεις που ακολούθησαν μη μηδενικής τιμής (για λόγους αλγοριθμικής ευστάθειας των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων) για την παραμένουσα συνοχή, συγκεκριμένα $c_R=0.1\text{kPa}$.

Τα αποτελέσματα αυτής της σειράς αναλύσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Στις αναλύσεις αυτές, το κύριο τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης βρίσκεται σε βάθος περίπου 42m κατά μέσο όρο από την ελεύθερη επιφάνεια (5m πάνω από το θεωρούμενο στρώμα ασβεστορροδίτη) στο κύριο σώμα της κατολίσθησης, ενώ ο υδροφόρος ορίζοντας είναι στη στάθμη που φαίνεται στο Σχήμα 3.16, δηλαδή σε βάθος περίπου 8m κατά μέσο όρο στο κύριο σώμα της κατολίσθησης. Ο πόδας της επιφάνειας ολίσθησης βρίσκεται σε απόσταση 1080m από την κεφαλή της κατολίσθησης.

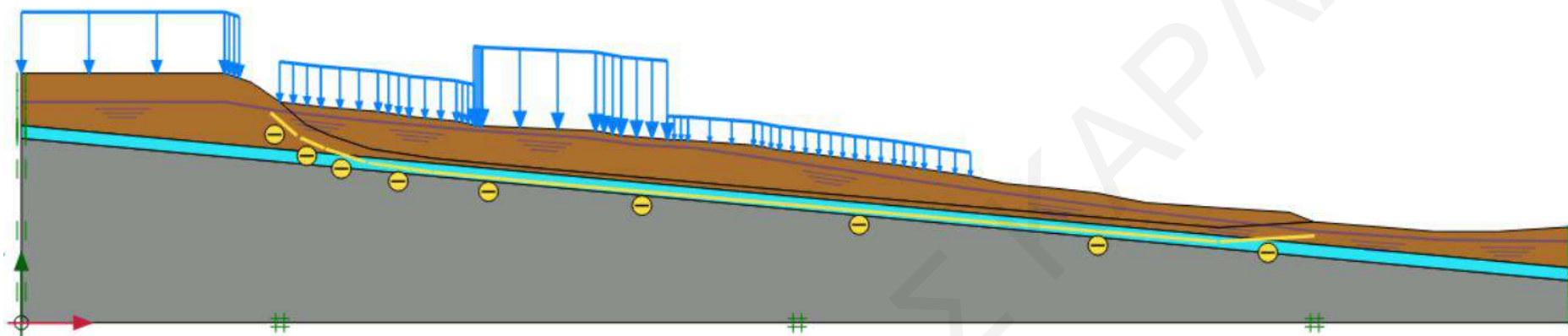
Πίνακας 4.1. Τιμές συντελεστή ασφαλείας για διάφορους συνδυασμούς τιμών παραμέτρων παραμένουσας αντοχής της μάργας.

Ανάλυση #	c_R (kPa)	ϕ_R (°)	FS	$\phi_{R,FS=1}$ (°)
1	0.1	10	1.07	9.4
2	0.1	12	1.28	9.4
3	0.1	15	1.60	9.5
4	8.0	10	1.12	8.9
5	9.6	12	1.38	8.8
6	12.2	15	1.74	8.8
7	16.0	10	1.29	7.8
8	19.3	12	1.57	7.7
9	24.3	15	1.75	8.7

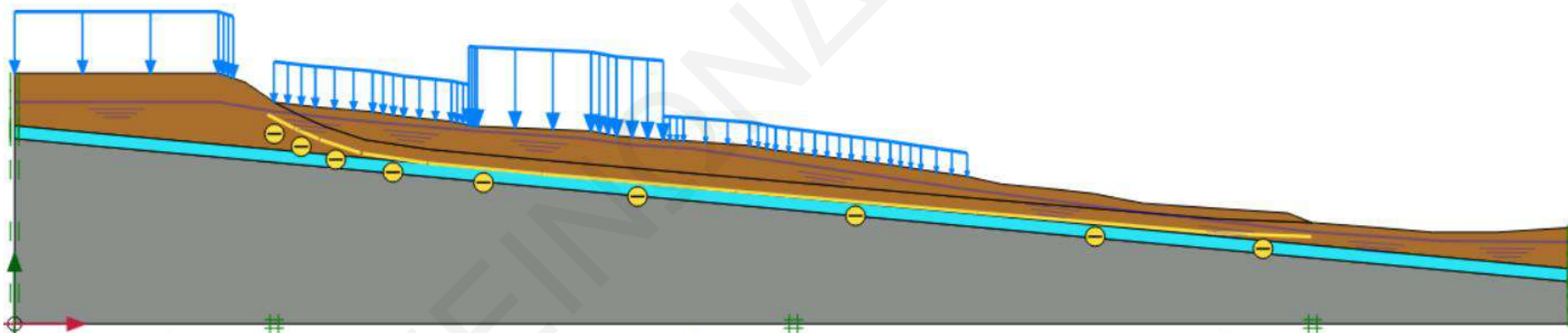
Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.1 προκύπτει ότι, για μια δεδομένη τιμή της γωνίας τριβής, η τιμή του FS μειώνεται κατά 0.01 για κάθε 1kPa μείωσης στην τιμή της συνοχής. Συνεπώς, η τιμή FS για $c_R=0$ αναμένεται να είναι κατά 0.001 μικρότερη από ότι αυτή που υπολογίζεται για $c_R=0.1\text{kPa}$. Η αντίστοιχη διαφορά στην $\phi_{R,FS=1}$ είναι μικρότερη από 0.01° . Συνεπώς η επίδραση της εν λόγω μη μηδενικής τιμής παραμένουσας συνοχής στα αποτελέσματα είναι αμελητέα.

4.2 Βάθος επιφάνειας ολίσθησης και υδροφόρου ορίζοντα

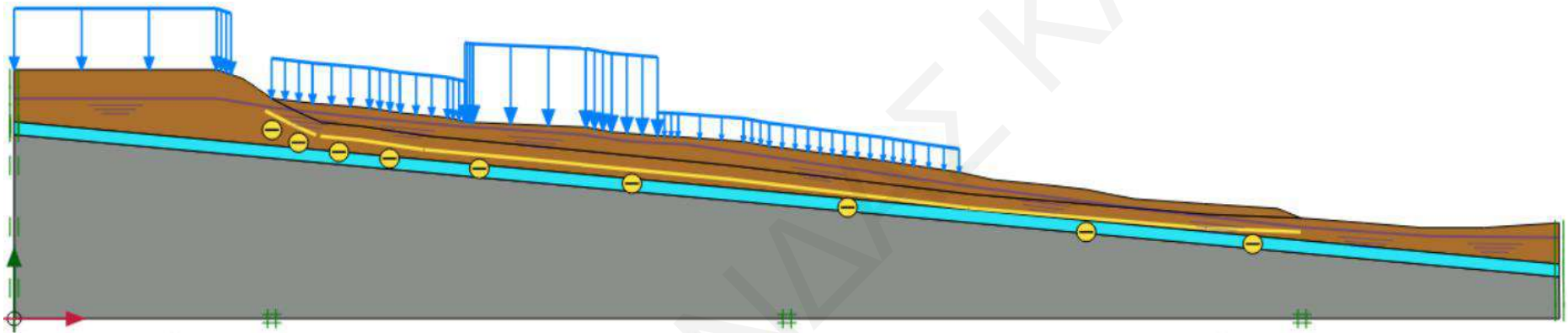
Για τον καθορισμό του βάθους της επιφάνειας ολίσθησης εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις (σενάρια A1, A2, A3). Με βάση τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά και τα γεωλογικά δεδομένα, επιλέχθηκε και στα τρία σενάρια το κύριο τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης (η βάση) να είναι παράλληλη στις επιφάνειες διαστρωμάτωσης, ακολουθώντας έτσι ορίζοντες αδυναμίας εντός της μάργας. Το ανάντη τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης αποτελεί προέκταση σε βάθος της κατοπτρικής επιφάνειας της παλαιοκατολίσθησης, ενώ το κανάντη τμήμα αναδύεται στην ελεύθερη επιφάνεια στη θέση του φαινόμενου πόδα της παλαιοκατολίσθησης σε απόσταση 1080m από την κεφαλή της. Η θεωρούμενη μορφή της επιφάνειας ολίσθησης αντιστοιχεί σε μια σύνθετου τύπου κατολίσθηση (μεταθετική-περιστροφική) με ισχυρότερο το μεταθετικό χαρακτήρα. Στο πρώτο σενάριο γεωμετρίας (A1), η βάση της επιφάνειας ολίσθησης σχεδιάστηκε 5m πάνω από το στρώμα ασβεστορρουδίτη, στο δεύτερο σενάριο γεωμετρίας (A2) στα 15m και στο τρίτο (A3) στα 25m. Τα αντίστοιχα μοντέλα παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.1 έως 4.3. Το μέσο βάθος της βάσης της επιφάνειας ολίσθησης από την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους στην περιοχή του κυρίου σώματος είναι 42m για το A1, 32m για το A2 και 22m για το A3. Για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές στάθμες του φρεάτιου υδροφόρου ορίζοντα: i) η στάθμη που φαίνεται στο Σχήμα 3.16 (στάθμη αναφοράς), η οποία αντιστοιχεί σε 8m βάθος φρεάτιου ορίζοντα στο κύριο σώμα της κατολίσθησης, ii) 2m υψηλότερα από τη στάθμη αναφοράς και iii) 4m χαμηλότερα από τη στάθμη αναφοράς. Η στάθμη αναφοράς αντιστοιχεί σε μετρήσεις που έγιναν Σεπτέμβριο-Οκτώβριο του 2015, στο τέλος της ξηράς περιόδου ενός έτους με 12% μεγαλύτερη βροχόπτωση από την κανονική (ελαφρά πολυομβρία). Συνεπώς αναμένεται ότι η χειμερινή στάθμη θα είναι υψηλότερα.



Σχήμα 4.1. Επιφάνεια ολίσθησης για το σενάριο A1 (μέσο βάθος βάσης ολίσθησης 42m).



Σχήμα 4.2. Επιφάνεια ολίσθησης για το σενάριο A2 (μέσο βάθος βάσης ολίσθησης 32m).



Σχήμα 4.3. Επιφάνεια ολίσθησης για το σενάριο A3 (μέσο βάθος βάσης ολίσθησης 22m).

Τα αποτελέσματα των 9 συνδυασμών βάθους βάσης επιφάνειας ολίσθησης και στάθμης υδροφόρου ορίζοντα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Από την ανάλυση του μοντέλου του σεναρίου A1 (επιφάνεια ολίσθησης 5m πάνω από το στρώμα ασβεστορρουδίτη) παρατηρείται ότι όσο μειώνεται το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα αυξάνεται η τιμή της ϕ_R που απαιτείται ώστε $FS=1$ ($\phi_{R,FS=1}$), δηλαδή η ολισθαίνουσα μάζα να βρίσκεται σε οριακή ισορροπία. Μετατοπίζοντας την θέση του υδροφόρου ορίζοντα κατά 2m ψηλότερα από ότι μετρήθηκε την περίοδο Σεπτεμβρίου - Οκτωβρίου 2015, η γωνία τριβής $\phi_{R,FS=1}$ εκτιμάται από τις αντίστροφες αναλύσεις ότι είναι της τάξης των 10° , δηλαδή εντός του εύρους τιμών που προβλέπει η βιβλιογραφία για τους αδύναμους ορίζοντες του υπεδάφους του Σχήματος 3.39.

Πίνακας 4.2. Αποτελέσματα αντίστροφων αναλύσεων για το σενάριο όπου η βάση της επιφάνειας ολίσθησης είναι στα 42m βάθος.

Σενάριο A1: Επιφάνεια ολίσθησης στα 42m βάθος											
Υδροφόρος: 8m βάθος				Υδροφόρος: 6m βάθος				Υδροφόρος: 12m βάθος			
Av. #	ϕ_R (°)	FS	$\phi_{R,FS=1}$ (°)	Av. #	ϕ_R (°)	FS	$\phi_{R,FS=1}$ (°)	Av. #	ϕ_R (°)	FS	$\phi_{R,FS=1}$ (°)
1	10	1.07	9.4	10	11	1.11	9.9	13	10	1.16	8.6
2	12	1.28	9.4	11	12	1.21	10.0	14	12	1.40	8.6
3	15	1.60	9.5	12	15	1.52	10.0	15	15	1.71	8.9

Οι Πίνακες 4.3 και 4.4 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων με την επιφάνεια ολίσθησης να έχει σχεδιαστεί 15m και 25m πάνω από το στρώμα ασβεστορρουδίτη (Σενάριο A2 και Σενάριο A3, αντίστοιχα). Παρατηρείται ότι οι τιμές γωνίας τριβής που δίνουν συντελεστή ασφάλειας μονάδα ($\phi_{R,FS=1}$) μειώνονται αισθητά σε σύγκριση με το Σενάριο A1. Αυτό ισχύει και για τις τρεις εξεταζόμενες στάθμες του υδροφόρου ορίζοντα. Καθίσταται συνεπώς σαφές ότι όσο βαθύτερα είναι η επιφάνεια ολίσθησης εντός της γκρι μάργας, η $\phi_{R,FS=1}$ αυξάνεται.

Πίνακας 4.3. Αποτελέσματα αντίστροφων αναλύσεων για το σενάριο όπου η βάση της επιφάνειας ολίσθησης είναι στα 32m βάθος.

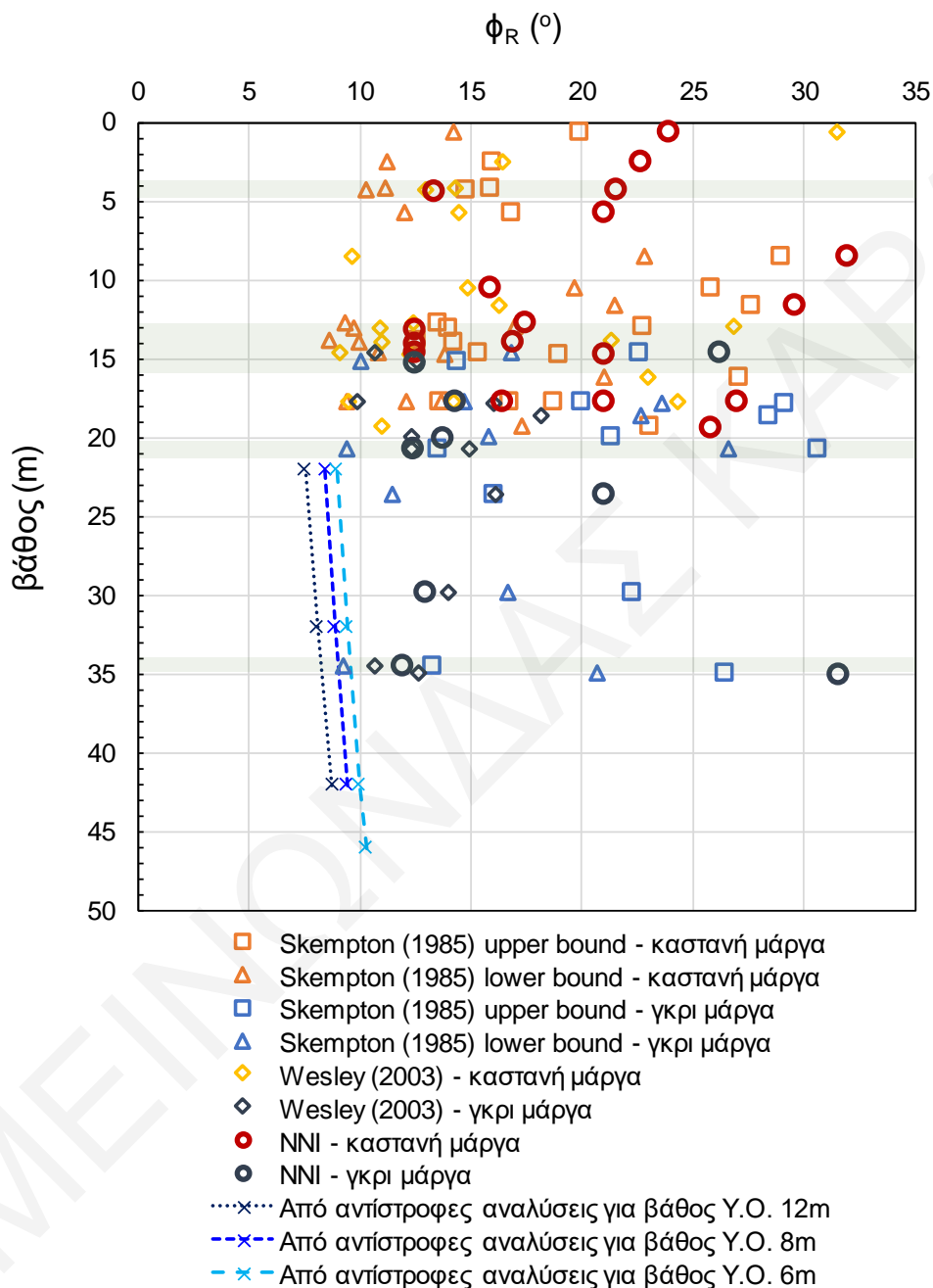
Σενάριο A2: Επιφάνεια ολίσθησης στα 32m βάθος											
Υδροφόρος: 8m βάθος				Υδροφόρος: 6m βάθος				Υδροφόρος: 12m βάθος			
Av. #	ϕ_R (°)	FS	$\phi_{R,FS=1}$ (°)	Av. #	ϕ_R (°)	FS	$\phi_{R,FS=1}$ (°)	Av. #	ϕ_R (°)	FS	$\phi_{R,FS=1}$ (°)
16	10	1.14	8.8	19	10	1.07	9.4	22	10	1.26	8.0
17	12	1.37	8.8	20	12	1.28	9.4	23	12	1.52	8.0
18	15	1.70	9.0	21	15	1.61	9.4	24	14	1.72	8.2

Πίνακας 4.4. Αποτελέσματα αντίστροφων αναλύσεων για το σενάριο όπου η βάση της επιφάνειας ολίσθησης είναι στα 22m βάθος.

Σενάριο A3: Επιφάνεια ολίσθησης στα 22m βάθος											
Υδροφόρος: 8m βάθος				Υδροφόρος: 6m βάθος				Υδροφόρος: 12m βάθος			
Av. #	ϕ_R (°)	FS	$\phi_{R,FS=1}$ (°)	Av. #	ϕ_R (°)	FS	$\phi_{R,FS=1}$ (°)	Av. #	ϕ_R (°)	FS	$\phi_{R,FS=1}$ (°)
25	10	1.20	8.4	28	10	1.13	8.9	31	10	1.34	7.5
26	12	1.44	8.4	29	12	1.35	8.9	32	12	1.62	7.5
27	14	1.67	8.5	30	15	1.68	9.1	33	13	1.71	7.7

Στο Σχήμα 4.4 γίνεται υπέρθεση των τιμών της παραμένουσας γωνίας τριβής της μάργας που υπολογίστηκαν από τις αντίστροφες αναλύσεις των πινάκων 4.2 - 4.4 στις εκτιμήσεις από τη βιβλιογραφία. Από τη σύγκριση συμπεραίνεται ότι είναι εξαιρετικά απίθανο η επιφάνεια ολίσθησης να βρίσκεται στα 22m με 32m βάθος, αφού οι τιμές $\phi_{R,FS=1}$ που υπολογίστηκαν ακόμη και για την υψηλή στάθμη υδροφόρου ορίζοντα είναι σαφώς μικρότερες από τις ελάχιστες τιμές που εκτιμώνται βάσει της βιβλιογραφίας. Το πλέον πιθανό σενάριο είναι η επιφάνεια ολίσθησης να βρίσκεται μεταξύ 32m και 47m βάθος, όπου και τελειώνει το στρώμα μάργας, με την παραμένουσα γωνία τριβής της γκρι μάργας να είναι γύρω στις 10°. Αυτό συνάδει με τα δεδομένα κλισιομετρήσεων που έχει διενεργήσει το ΤΓΕ, τα οποία δείχνουν ότι η επιφάνεια ολίσθησης στο κεντρικό τμήμα του κυρίως σώματος της κατολίσθησης (γεώτρηση EG2018/002) βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο από 28m. Με βάση τα παραπάνω και με δεδομένο ότι όσο βαθύτερα είναι η βάση της επιφάνειας ολίσθησης εντός της γκρι μάργας τόσο μεγαλύτερη προκύπτει η $\phi_{R,FS=1}$, στις αντίστροφες αναλύσεις που ακολουθούν για τον προσδιορισμό της θέσης του πόδα της κατολίσθησης (Ενότητα 4.3) θεωρήθηκε ότι η βάση της επιφάνειας ολίσθησης

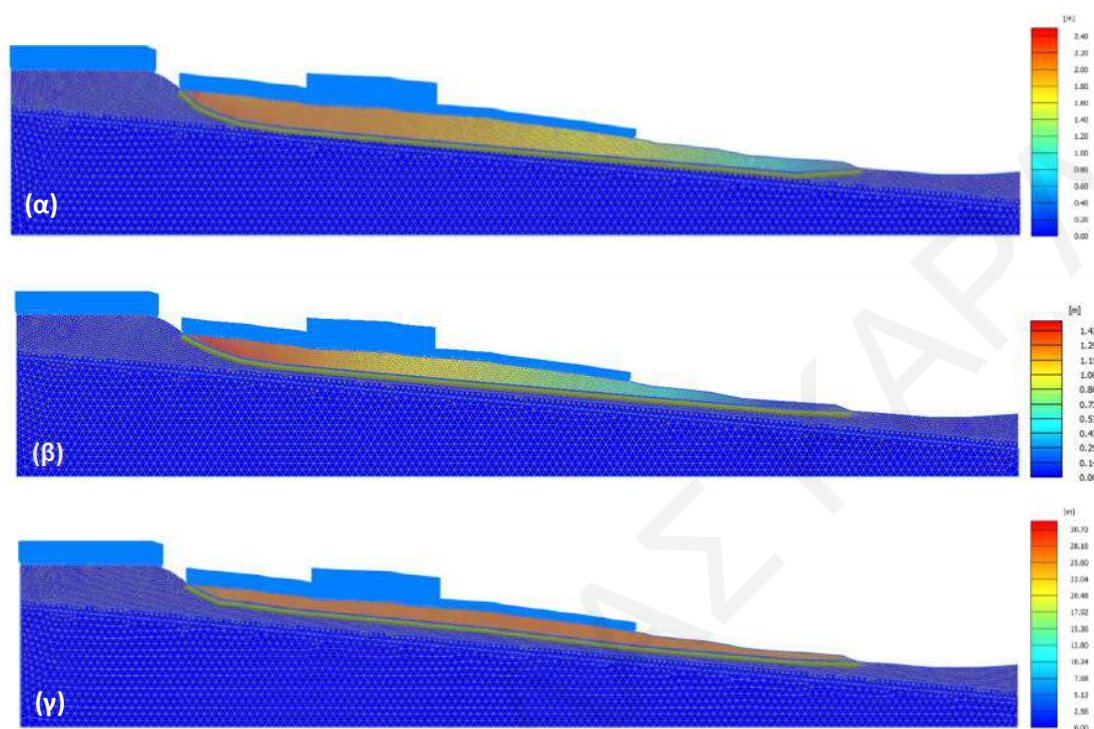
είναι στην πλέον δυσμενή θέση και συγκεκριμένα μόλις 1m πάνω από την επαφή μάργας-ασβεστορρουδίτη (46m βάθος), ενώ ο υδροφόρος ορίζοντας είναι στα 6m βάθος.



Σχήμα 4.4. Εξάρτηση της παραμένουσας γωνίας τριβής $\phi_{R,FS=1}$ σε συνάρτηση με το βάθος της βάσης τη επιφάνειας ολίσθησης και του υδροφόρου ορίζοντα.

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται τα διαγράμματα (countours) των μετατοπίσεων από τις αναλύσεις με υψηλό υδροφόρο ορίζοντα (6m μέσο βάθος) και $\phi_R = 10^\circ-11^\circ$. Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι το μέγεθος των μετατοπίσεων προκύπτει γενικά μεγαλύτερο στο

ανάντη τμήμα της ολισθαίνουσας μάζας από ότι στο κανάντη. Αυτό το αποτέλεσμα συνάδει με τις δορυφορικές παρατηρήσεις (Σχήμα 2.15) και οφείλεται στη συμπίεση των γεωυλικών στη ζώνη συσσώρευσης της ολισθαίνουσας μάζας.



Σχήμα 4.5. Διαγράμματα μετατοπίσεων από: α) Ανάλυση 10, β) Ανάλυση 19 και γ) Ανάλυση 28.

Τα αντίστοιχα διαγράμματα για το σύνολο των αναλύσεων των παραπάνω πινάκων δίνονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. Σε ορισμένες αναλύσεις, πέρα από την μετακίνηση της μάζας εδάφους που βρίσκεται πάνω από την προδιαγεγραμμένη επιφάνεια ολίσθησης, παρατηρείται κινητοποίηση μάζας εδάφους και δυτικά της κύριας κατακρήμνισης, δηλαδή του πρανούς ανάντη της παλαιοκατολίσθησης (π.χ. Σχήματα Π3, Π5, Π6, Π9, Π26). Αυτό συμβαίνει στις αναλύσεις όπου ο συντελεστής ασφαλείας είναι 1.38 και μεγαλύτερος, γεγονός που υποδηλώνει ότι το FS του ανάντη πρανούς είναι περίπου 1.4 για τις τιμές παραμέτρων αντοχής $c'=40\text{kPa}$ και $\phi'=27^\circ$ που υποτέθηκαν για την «αδιατάρακτη» μάργα. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι η συνεχής απώλεια στήριξης της βάσης της κύριας κατακρήμνισης λόγω της μετακίνησης της παλαιοκατολίσθησης συνεπάγεται τη σταδιακή μείωση του παραπάνω συντελεστή ασφαλείας, η οποία μοιραία θα οδηγήσει στην επέκταση του κατολισθητικού φαινομένου δυτικότερα (φαινόμενο retrogressive propagation).

4.3 Καθορισμός θέσης πόδα κατολίσθησης

Έχοντας καθορίσει ότι η επιφάνεια ολίσθησης βρίσκεται βαθιά μέσα στο στρώμα της γκρι μάργας σχηματισμού Λευκωσίας, επόμενο βήμα αποτέλεσε η εξέταση της πιθανής θέσης του πόδα της κατολίσθησης. Ως θέση αναφοράς θεωρήθηκε η απόληξη του πόδα της παλαιοκατολίσθησης όπως αυτή διαφαίνεται από τη γεωμορφολογία της περιοχής και είναι αυτή που θεωρήθηκε και στις προηγούμενες αναλύσεις (Αναλύσεις 1-33). Σε αυτή την ενότητα εξετάζονται εννέα εναλλακτικές περιπτώσεις για τη θέση του πόδα, συγκεκριμένα 100m, 300m, 500m και 700m ανάντη της θέσης αναφοράς και 200m, 400m, 600m, 800m και 1000m κατάντη της θέσης αναφοράς. Το μέσο βάθος της βάσης της επιφάνειας ολίσθησης στην περιοχή του κυρίου σώματος είναι 46m (1m πάνω από το στρώμα ασβεστορρουδίτη). Επίσης, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα θεωρείται στα 6m βάθος κατά μέσο όρο στην περιοχή του κυρίου σώματος της κατολίσθησης και η παραμένουσα συνοχή της μάργας είναι ίση με 0.1kPa. Τα αποτελέσματα αυτών των αντίστροφων αναλύσεων παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.5 έως 4.8. Επιπλέον, τα διαγράμματα μετατοπίσεων από τις αναλύσεις με $\phi_R=10^\circ-11^\circ$ παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.6 και 4.7.

Πίνακας 4.5. Αποτελέσματα αντίστροφων αναλύσεων με τον πόδα έως και 300m ανάντη από τη θέση αναφοράς.

Σενάριο B0: πόδας στη θέση αναφοράς				Σενάριο B1: πόδας 100m ανάντη				Σενάριο B2: πόδας 300m ανάντη			
Αν. #	ϕ_R (°)	FS	$\phi_{R,FS=1}$ (°)	Αν. #	ϕ_R (°)	FS	$\phi_{R,FS=1}$ (°)	Αν. #	ϕ_R (°)	FS	$\phi_{R,FS=1}$ (°)
34	11	1.07	10.3	37	11	1.08	10.2	40	10	1.02	9.8
35	12	1.17	10.3	38	12	1.18	10.2	41	12	1.22	9.9
36	15	1.48	10.3	39	15	1.51	10.1	42	15	1.53	9.9

Πίνακας 4.6. Αποτελέσματα αντίστροφων αναλύσεων με τον πόδα 500m και 700m ανάντη από τη θέση αναφοράς.

Σενάριο B3: πόδας 500m ανάντη				Σενάριο B4: πόδας 700m ανάντη			
Αν. #	ϕ_R (°)	FS	$\phi_{R,FS=1}$ (°)	Αν. #	ϕ_R (°)	FS	$\phi_{R,FS=1}$ (°)
43	10	1.19	8.4	46	10	1.30	7.7
44	12	1.43	8.5	47	12	1.58	7.7
45	15	1.71	8.9	48	15	1.72	8.9

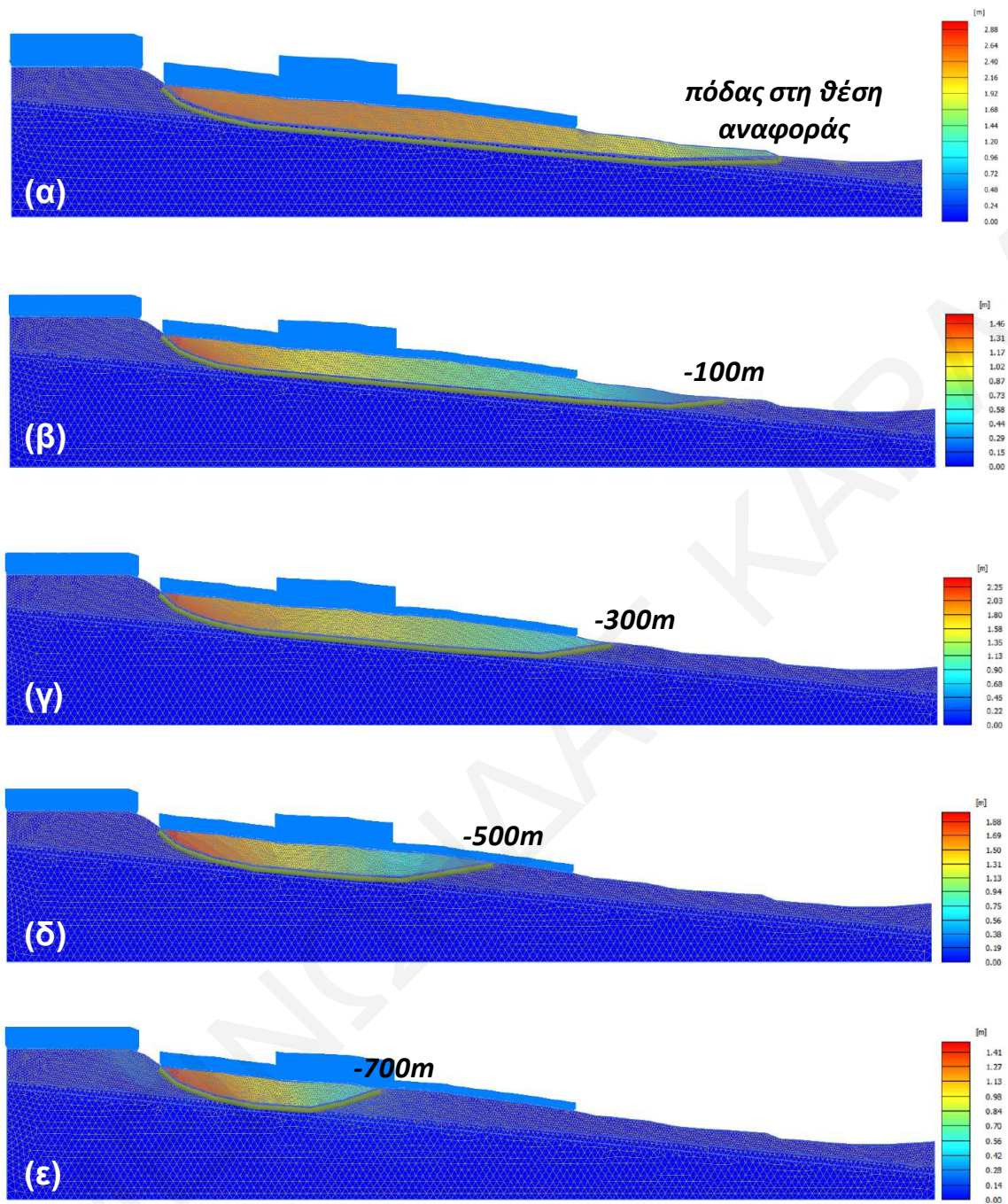
Πίνακας 4.7. Αποτελέσματα αντίστροφων αναλύσεων με τον πόδα 200m έως 600m κατάντη από τη θέση αναφοράς.

Σενάριο B5: πόδας 200m κατάντη				Σενάριο B6: πόδας 400m κατάντη				Σενάριο B7: πόδας 600m κατάντη			
Av. #	ϕ_R (°)	FS	$\phi_{R,FS=1}$ (°)	Av. #	ϕ_R (°)	FS	$\phi_{R,FS=1}$ (°)	Av. #	ϕ_R (°)	FS	$\phi_{R,FS=1}$ (°)
49	11	1.10	10.0	52	12	1.13	10.7	55	10	1.04	9.6
50	12	1.13	10.7	53	13	1.20	10.9	56	12	1.23	9.8
51	15	1.49	10.2	54	15	1.52	10.0	57	15	1.52	10.0

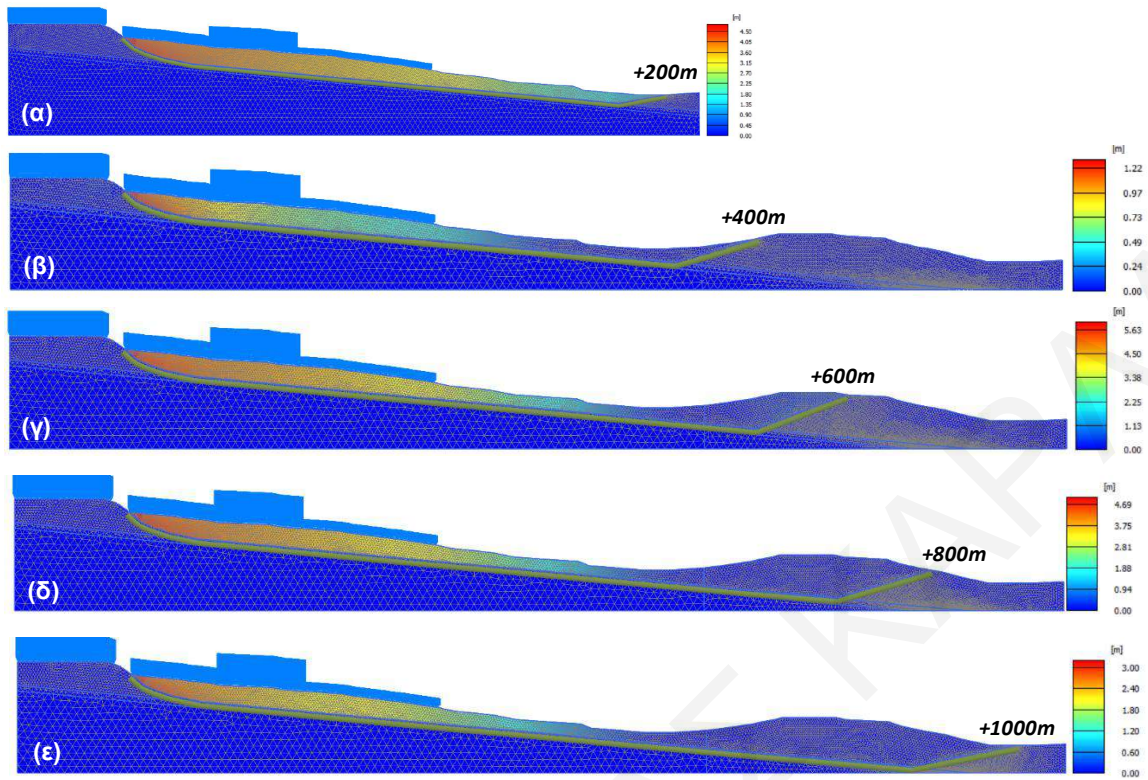
Πίνακας 4.8. Αποτελέσματα αντίστροφων αναλύσεων με τον πόδα 800m και 1000m κατάντη από τη θέση αναφοράς.

Σενάριο B8: πόδας 800m κατάντη				Σενάριο B9: πόδας 1000m			
Av. #	ϕ_R (°)	FS	$\phi_{R,FS=1}$ (°)	Av. #	ϕ_R (°)	FS	$\phi_{R,FS=1}$ (°)
58	11	1.12	9.8	61	11	1.10	10.0
59	12	1.15	10.5	62	12	1.14	10.6
60	15	1.52	10.0	63	15	1.50	10.1

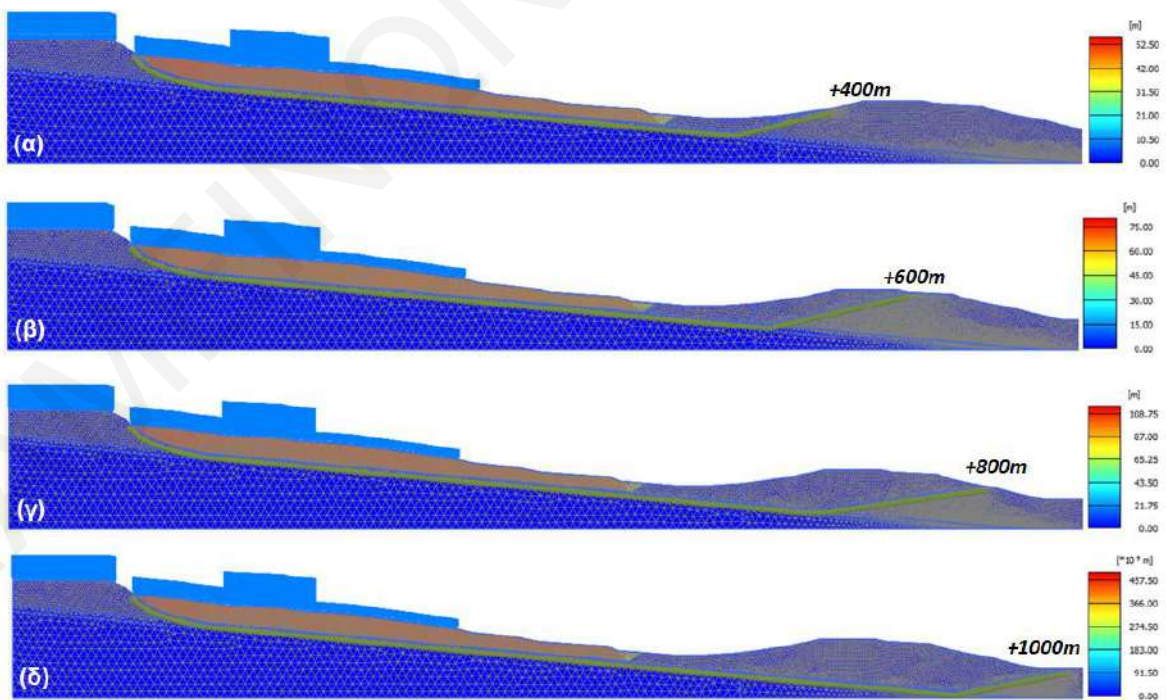
Στα αποτελέσματα που παρατίθενται στους παραπάνω πίνακες παρατηρούμε ότι, με εξαίρεση τις περιπτώσεις όπου ο πόδας βρίσκεται πολύ δυτικότερα από τη θέση αναφοράς, συγκεκριμένα 500m και 700m ανάντη, οι τιμές της $\phi_{R,FS=1}$ είναι εντός του εύρους 9°-11°. Επιπλέον, όσο μετατοπίζεται ο πόδας προς τα ανάντη, η υπολογιζόμενη $\phi_{R,FS=1}$ μειώνεται σημαντικά. Αντίστοιχα σημειώνεται μείωση όσο μετατοπίζεται ο πόδας προς τα κατάντη, αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό. Αυτό οφείλεται στο ότι για θέσεις του πόδα 400m και πλέον κατάντη από τη θέση αναφοράς δεν κινητοποιείται όλη η μάζα του εδάφους που βρίσκεται πάνω από τη σχεδιασμένη επιφάνεια ολίσθησης, αλλά δημιουργείται μια ζώνη διάτμησης που διαπερνά την «αδιατάρακτη» μάργα και αναδύεται στην ελεύθερη επιφάνεια μόλις 50m ανατολικότερα από τη θέση αναφοράς, δηλαδή πολύ δυτικότερα από την εκάστοτε θεωρούμενη θέση για τον πόδα της κατολίσθησης. Αυτό σημαίνει ότι οποιαδήποτε επέκταση της επιφάνειας ολίσθησης πέραν των 400m από τη θέση αναφοράς καθιστά την επιφάνεια ολίσθησης μη κρίσιμη και τα αποτελέσματα της ανάλυσης γίνονται πρακτικώς ανεξάρτητα της θεωρούμενης θέσης του πόδα.



Σχήμα 4.6. Διαγράμματα μετατοπίσεων από αναλύσεις α) #34, β) #37, γ) #40, δ) #43 και ε) #46.



Σχήμα 4.7. Διαγράμματα μετατοπίσεων από αναλύσεις α) #49, β) #52, γ) #55, δ) #58 και ε) #61.

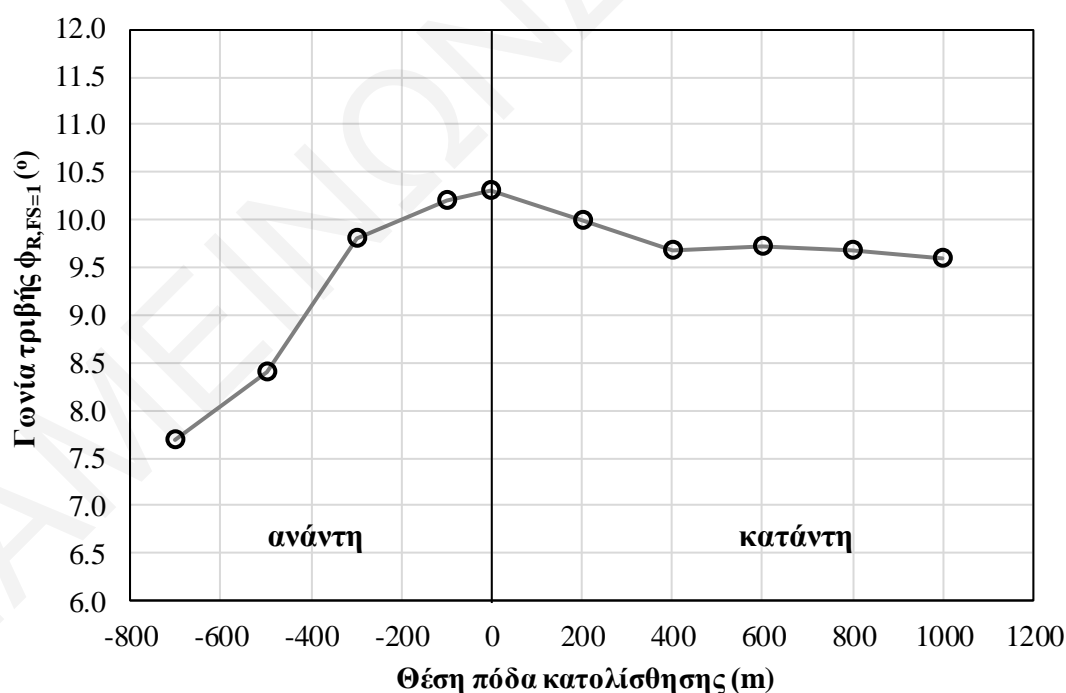


Σχήμα 4.8. Διαγράμματα μετατοπίσεων από αναλύσεις α) #64, β) #65, γ) #66 και δ) #67.

Η μεταβολή της $\phi_{R,FS=1}$ όσο μετατοπίζεται η θέση του πόδα προς τα κατάντη δεν είναι απόλυτα μονοτονική, κάτι που δεν αναμένεται από τη φύση του προβλήματος. Ως εκ τούτου, αναλύσεις με τον πόδα 400m έως 1000m κατάντη της θέσης αναφοράς επαναλήφθηκαν με το κατάντη αναδύμενο τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης να έχει μικρότερη κλίση, που αποτελεί μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση σε ότι αφορά τη γεωμετρία της (Σχήμα 4.8). Τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.9, όπου παρατηρούμε ότι η $\phi_{R,FS=1}$ παραμένει πρακτικά η ίδια (9.7°).

Πίνακας 4.9. Αποτελέσματα αντίστροφων αναλύσεων με τον πόδα 400m έως 1000m κατάντη από τη θέση αναφοράς και ομαλή ανάδυση της επιφάνειας ολίσθησης.

Αν. #	Σενάριο	Θέση πόδα (m)	ϕ_R (°)	FS	$\phi_{R,FS=1}$ (°)
64	B6*	+400	11	1.14	9.68
65	B7*	+600	12	1.24	9.73
66	B8*	+800	11	1.14	9.68
67	B9*	+1000	11	1.15	9.59



Σχήμα 4.9. Διάγραμμα μεταβολής της παραμένουσας γωνίας τριβής της μάργας $\phi_{R,FS=1}$ με την θέση του πόδα της κατολίσθησης.

Στο Σχήμα 4.9 αξιοποιούνται τα αποτελέσματα $\phi_{R,FS=1}$ από τις αναλύσεις όπου η τιμή εισαγωγής ϕ_R είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, δηλαδή $10^\circ-11^\circ$ (με εξαίρεση την περίπτωση B7* όπου η γωνία είναι 12°). Αυτές οι τιμές $\phi_{R,FS=1}$ θεωρούνται οι πιο αντιπροσωπευτικές διότι μικρότερη διαφορά μεταξύ εισαγόμενου ϕ_R και εξαγόμενου $\phi_{R,FS=1}$ αναμένεται να ενέχει μικρότερο αριθμητικό σφάλμα που συσσωρεύεται κατά την πορεία της ανάλυσης με τη μέθοδο strength reduction. Το διάγραμμα παρουσιάζει τη μεταβολή της $\phi_{R,FS=1}$ ανάλογα με τη θέση του πόδα της κατολίσθησης. Από το διάγραμμα συμπεραίνεται ότι το να βρίσκεται ο πόδας περισσότερο από 300m δυτικότερα από τη θέση αναφοράς είναι ουσιαστικά αδύνατο, διότι με βάση τη βιβλιογραφία $\phi_{R,FS=1}$ μικρότερη από 9° δεν αναμένεται σε κανένα ορίζοντα του εδαφικού προφίλ.

Η μέγιστη τιμή $\phi_{R,FS=1}$ (10.3°) προκύπτει για την περίπτωση που ο πόδας βρίσκεται στη θέση αναφοράς (0m), δηλαδή όταν ο πόδας της τρέχουσας αστάθειας ταυτίζεται με αυτόν της παλαιοκατολίσθησης. Η τιμή 10.3° είναι σαφώς εντός του εύρους τιμών από τη βιβλιογραφία για τους αδύναμους ορίζοντες (ορίζοντες μεγάλης πλαστικότητας) της γκρι μάργας (Σχήμα 3.39), όπως π.χ. στα 34.5m βάθος. Μελετώντας το διάγραμμα είναι σαφές ότι υπάρχουν περισσότερες από μια θέσεις στις οποίες θα μπορούσε να εντοπίζεται ο πόδας της κατολίσθησης, καθώς σε αρκετές η αντίστοιχη γωνία τριβής $\phi_{R,FS=1}$ είναι ίση ή και μεγαλύτερη από 9.5° . Οι τιμές $9.6^\circ-10^\circ$ που προκύπτουν για θέση πόδα 300m ανάντη και 200m κατόντη είναι πάνω από το κατώτερο όριο του Skempton (1985), που είναι $9.3^\circ-9.4^\circ$ για τους ορίζοντες μεγάλης πλαστικότητας. Εντούτοις, κρίνεται σαφώς πιθανότερο ενδεχόμενο ο πόδας να βρίσκεται στη θέση αναφοράς (ή και 100m ανάντη), συμπέρασμα που συνάδει και με τις δορυφορικές παρατηρήσεις των Hearn et al. (2018).

Επομένως, με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων που παρουσιάστηκαν παραπάνω, το επικρατέστερο σενάριο σε ότι αφορά τη γεωμετρία της επιφάνειας ολίσθησης, για το οποίο θα εκτελεστούν στο επόμενο κεφάλαιο αναλύσεις σχεδιασμού μέτρων σταθεροποίησης, είναι αυτό της πλήρους επανενεργοποίησης της παλαιοκατολίσθησης, όπου η βάση της επιφάνειας ολίσθησης είναι εντός της γκρι μάργας στα 40-47m βάθος, ο φρεάτιος ορίζοντας σε μέσο βάθος 6m και ο πόδας της τρέχουσας κατολίσθησης στην απόληξη ποδός της παλαιοκατολίσθησης. Η γωνία τριβής $\phi_{R,FS=1}$ τίθεται ίση με 10.5° .

4.4 Αίτια επανενεργοποίησης της παλαιοκατολίσθησης

Τα αίτια επανενεργοποίησης της παλαιοκατολίσθησης πρέπει να αναζητηθούν μεταξύ των συνθηκών που μεταβλήθηκαν με την ανάπτυξη γης στο διάστημα 1990-2010. Ένας παράγοντας είναι η προσθήκη των φορτίων των κατασκευών που ανεγέρθησαν κατά την διάρκεια των δυο αυτών δεκαετιών και ο άλλος είναι η άνοδος της στάθμης του φρεάτιου υδροφόρου ορίζοντα λόγω των στραγγισμάτων των απορροφητικών λάκκων εν τη πλήρη απουσία κεντρικού αποχετευτικού συστήματος. Η έντονη βροχόπτωση των υδρολογικών ετών 2009/10 και 2011/12 είναι συγκυριακός εναυσματικός παράγοντας, καθώς έτη με αντίστοιχα ή και μεγαλύτερα ύψη βροχόπτωσης είχαν συμβεί πολλές φορές και συχνά στο παρελθόν.

Αφαιρώντας τα φορτία κατασκευών από την ανάλυση #10, ο συντελεστής ασφαλείας προκύπτει μόλις 0.4% μεγαλύτερος. Αυτό σημαίνει ότι η προσθήκη των φορτίων των κατασκευών οδηγεί σε μια μείωση του συντελεστή ασφαλείας FS κατά 0.4%. Αντίθετα, από τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.2, κάθε 1m αύξησης της στάθμης του φρεάτιου ορίζοντα οδηγεί χονδρικά σε μια πτώση του FS κατά 3%. Όπως δείχνουν οι υπολογισμοί που παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο, η ετήσια ανύψωση της στάθμης του φρεάτιου ορίζοντα εξαιτίας των στραγγισμάτων της οικιακής κατανάλωσης, τα οποία λόγω της σχετικά μικρής διαπερατότητας της μάργας παραμένουν σε μεγάλο βαθμό και συσσωρεύονται στην περιοχή της κατολίσθησης, είναι 0.18m. Συνεπώς, στη διάρκεια 20 ετών η ανύψωση της στάθμης των υπογείων υδάτων ήταν πιθανότατα μεγαλύτερη από 3.5m, οδηγώντας σε μια μείωση του FS της τάξεως του 10%, δηλαδή πλέον της μιας τάξης μεγέθους μεγαλύτερη από ότι η μείωση που οφείλεται στην επιβολή των φορτίων των κατασκευών. Άρα ο κύριος παράγοντας που συντέλεσε στην επανενεργοποίηση της παλαιοκατολίσθησης είναι ουσιαστικά η ανάπτυξη γης χωρίς την ταυτόχρονη κατασκευή κεντρικού αποχετευτικού συστήματος.

Το γεγονός ότι είναι πολύ βραδύς ο ρυθμός στράγγισης εκτός περιοχής κατολίσθησης των υδάτων από την αστική χρήση και ότι αυτά παραμένουν επί μακρόν και συσσωρεύονται εντός της ολισθαίνουσας μάζας γίνεται εύκολα αντιληπτό αν λάβουμε υπόψη ότι οι ταχύτητες υπόγειας ροής του νερού προς τα κατάντη για μια τιμή υδραυλικής διαπερατότητας της μάργας 10^{-6} m/s και κλίσης φρεάτιου ορίζοντα 5° είναι μόλις λίγα μέτρα ανά έτος, ενώ η ακτίνα της περιοχής της επίμαχης οικιστικής ανάπτυξης είναι 250m. Δηλαδή πιθανόν να απαιτούνται πολλές δεκαετίες για να εξέλθει από την περιοχή της

κατολίσθησης ένας όγκος (π.χ 1m^3) ετήσιας κατανάλωσης νερού μέσω φυσικής υπόγειας ροής, ενώ τα στραγγίσματα των απορροφητικών λάκκων φτάνουν στον υδροφόρο ορίζοντα σε διάστημα μόλις λίγων ετών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΤΡΑ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Έχοντας ολοκληρώσει την τελική διαμόρφωση του προσομοιώματος της κατολίσθησης σε ότι αφορά τη γεωμετρία της επιφάνειας ολίσθησης (46m βάθος και με τον πόδα στη θέση του πόδα της παλαιοκατολίσθησης), την παραμένουσα γωνία τριβής της μάργας (10.5°) και την κρίσιμη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (6m βάθος) χάρη στις αντίστροφες αναλύσεις ευστάθειας, στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται τα μέτρα τα οποία θα μπορούσαν να σταθεροποιήσουν την κατολίσθηση. Στο πλαίσιο αυτό προτείνονται τρία διαφορετικά σενάρια για την σταθεροποίηση της κατολίσθησης. Για τον σχεδιασμό των σταθεροποιητικών μέτρων τέθηκε ως στόχος η επίτευξη συντελεστή ασφαλείας FS ίσου με 1.25, τιμή που εξασφαλίζει την απαιτούμενη ασφάλεια με βάση τον Ευρωκώδικα 7 – Κυπριακό Εθνικό Προσάρτημα (δεδομένου ότι τα όποια κινητά φορτία έχουν αμελητέα επίδραση στο εν λόγω πρόβλημα).

Το πρώτο σταθεροποιητικό σενάριο αφορά στην τοποθέτηση ενός μεγάλου επιχώματος (αντίβαρου). Το δεύτερο σενάριο περιλαμβάνει την κατασκευή ενός επιχώματος, σημαντικά μικρότερου συγκριτικά με εκείνο του πρώτου σεναρίου, σε συνδυασμό με την ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα κατά 4m μέσω αντλητικών γεωτρήσεων. Το τρίτο σενάριο στοχεύει στην σταθεροποίηση αποκλειστικά μέσω ενός δικτύου αντλητικών γεωτρήσεων για ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα κατά 9m. Η χρήση σταθεροποιητικών πασσάλων ή αγκυρίων δεν εξετάζεται διότι το μεγάλο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης (>40m) καθιστά απαγορευτική την εγκατάστασή τους.

Τα μέτρα αυτά με τον επιδιωκόμενο συντελεστή ασφαλείας $FS=1.25$ αναμένεται να μειώσουν σε πολύ μεγάλο βαθμό το ρυθμό ανάπτυξης μετακινήσεων του εδάφους, γεγονός που θα επιτρέψει την κατασκευή κεντρικού αποχετευτικού συστήματος και ενός αποτελεσματικού δικτύου συλλογής και απομάκρυνσης των ομβρίων υδάτων.

5.1 Σταθεροποίηση αποκλειστικά με επίχωμα ποδός

Το πρώτο σενάριο σταθεροποιητικών μέτρων αφορά στην κατασκευή ενός επιχώματος (αντίβαρου) αρκετά μεγάλων διαστάσεων. Το εν λόγω επίχωμα θα έχει μέγιστο μήκος 430m κατά τον άξονα της κατολίσθησης και ύψος 48m. Η κλίση του πρανούς του επιχώματος επιλέχθηκε να είναι 1:2. Το μέγεθος του επιχώματος μπορεί να γίνει

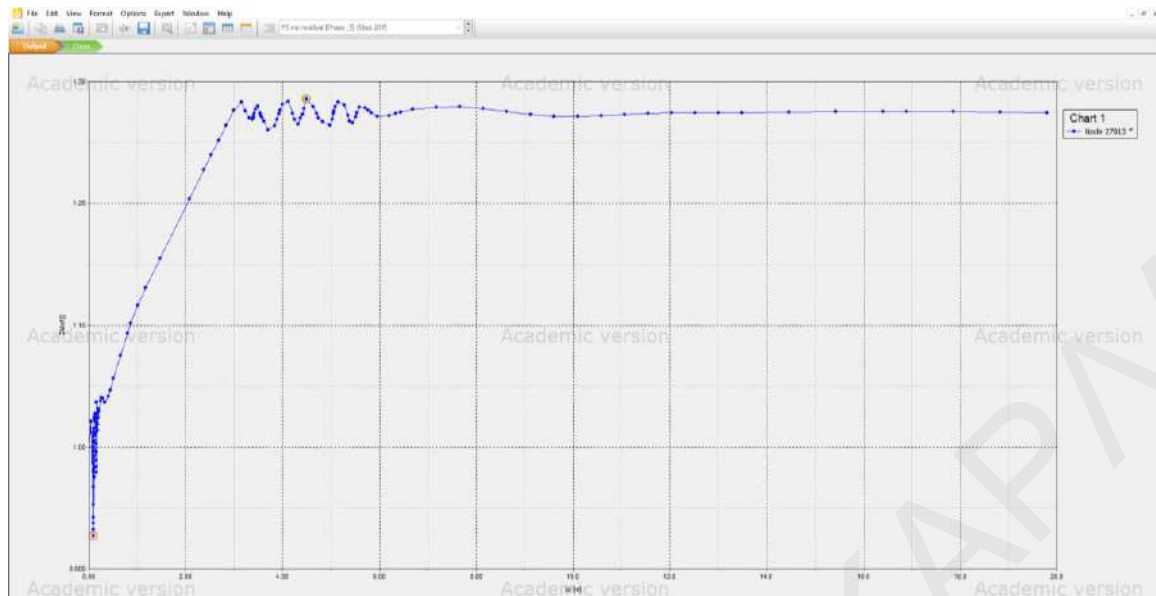
αντιληπτό, συγκρινόμενο με την έκταση της ολισθαίνουσας μάζας, από το Σχήμα 5.1, όπου το επίχωμα αναπαρίσταται με ροζ χρώμα.



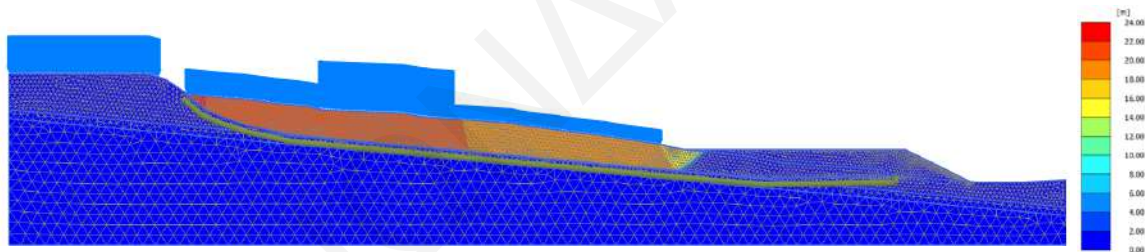
Σχήμα 5.1. Τομή της περιοχής της κατολίσθησης μετά την τοποθέτηση του επιχώματος του 1^{ου} σεναρίου μέτρων σταθεροποίησης.

Το επίχωμα θα αποτελείται από λιθορριπή ή καλά συμπυκνωμένο αμμοχάλικο ώστε να μπορεί να έχει γωνία τριβής 40° . Η χρήση λιθορριπής είναι προτιμότερη από οποιοδήποτε άλλο χονδρόκοκκο υλικό γιατί θα επιτρέψει την πολύ καλύτερη στράγγιση των όμβριων υδάτων. Για λόγους αριθμητικής ευστάθειας των αλγορίθμων πεπερασμένων στοιχείων, εισάγεται στο Plaxis 2D μια μικρή συνοχή c ίση με 0.1kPa για το υλικό του επιχώματος. Στο Σχήμα 5.2 φαίνεται η εξέλιξη του συντελεστή ΣMsf κατά τη διάρκεια της φάσης Safety στο Plaxis 2D του μοντέλου του Σχήματος 5.1. Από τον σταθεροποιημένο κλάδο της καμπύλης, βλέπουμε ότι η προτεινόμενη διαμόρφωση εξασφαλίζει τιμή 1.27 για τον συντελεστή ασφαλείας, ελάχιστα μεγαλύτερη από την απαιτούμενη τιμή 1.25.

Στο Σχήμα 5.3 απεικονίζεται η κατανομή των μετατοπίσεων που έχουν αναπτυχθεί στο προσομοίωμα μέχρι το πέρας της φάσης Safety, οι οποίες αποτυπώνουν την έκταση και τη γεωμετρία του δυνητικού μηχανισμού αστοχίας παρουσία του επιχώματος. Παρατηρούμε ότι λόγω της ύπαρξης του επιχώματος ο μηχανισμός αστοχίας παύει να περιλαμβάνει όλη την έκταση της παλαιοκατολίσθησης, και σταματάει σχεδόν εκεί που αρχίζει το επίχωμα, όπου και αναδύεται μια νέα ζώνη διάτμησης μέσα από την «αδιατάρακτη» μάργα.



Σχήμα 5.2. Γράφημα εξέλιξης διαίρετη διαμητικής αντοχής ΣMsf – μετατοπίσεως u από ανάλυση με μεγάλο σταθεροποιητικό επίχωμα ποδός.



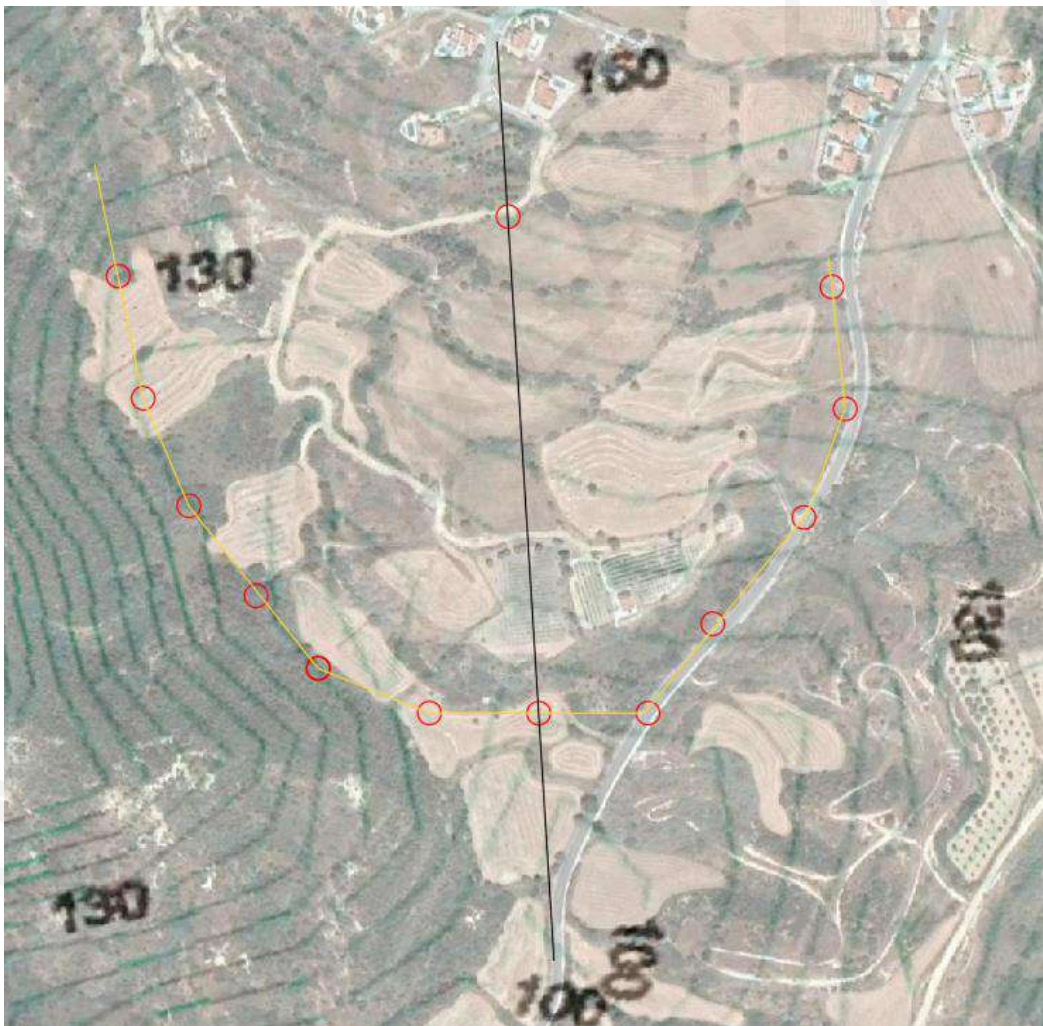
Σχήμα 5.3. Διάγραμμα μετατοπίσεων από ανάλυση με μεγάλο σταθεροποιητικό επίχωμα ποδός.

5.1.1 Σχεδίαση επιχώματος

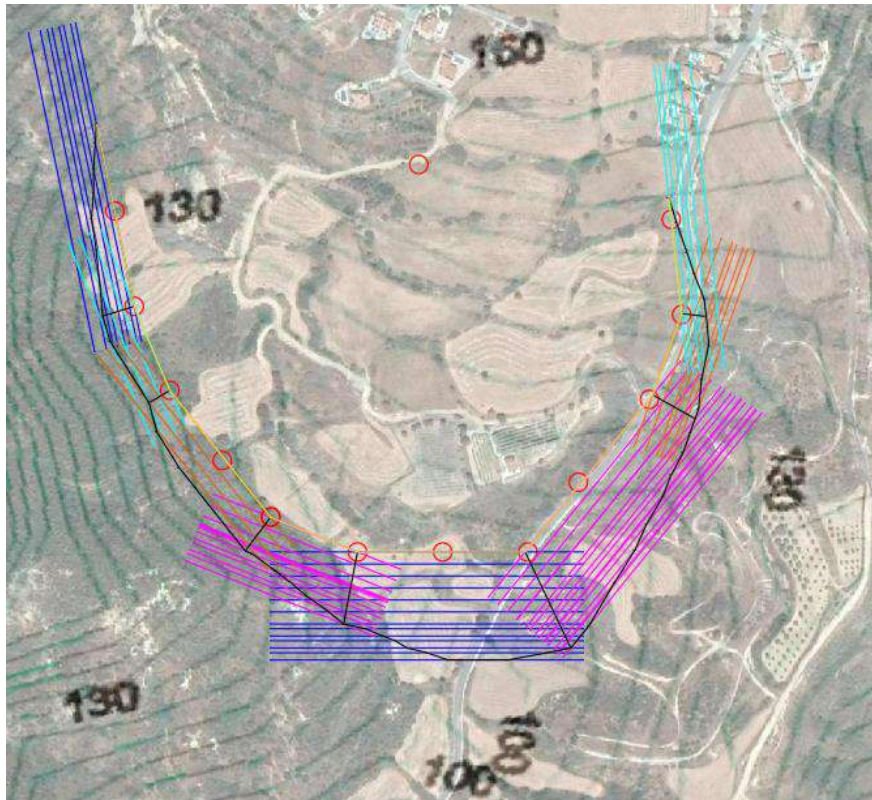
Για να θεωρηθεί επιτυχημένος ο σχεδιασμός του επιχώματος που προτείνεται στο 1^ο σενάριο σταθεροποιητικών μέτρων είναι απαραίτητο το επίχωμα να φράζει ολόκληρο το μέτωπο της κατολίθησης. Από την τομή του Σχήματος 5.1, υπήρχαν δυο χαρακτηριστικά, γνωστά σημεία από τα οποία μπορεί να ξεκινήσει η χάραξη της έκτασης του επιχώματος. Το πρώτο είναι το δυτικότερο άκρο του επιχώματος επί της τομής, σε υψόμετρο 145m, και το δεύτερο είναι το άλλο άκρο του οριζόντιου τμήματος της επιφάνειας του επιχώματος 332m ανατολικότερα και επίσης σε 145m υψόμετρο. Από το δεύτερο αυτό σημείο

χαράσσεται μια τεθλασμένη γραμμή σε σχήμα πέταλου που ακολουθεί γενικά τη γεωμετρία της απόληξης του πόδα της παλαιοκατολίσθησης σε οριζοντιογραφία. Αυτή η γραμμή ορίζει την στέψη του επιχώματος και φαίνεται στο Σχήμα 5.4 με κίτρινο χρώμα.

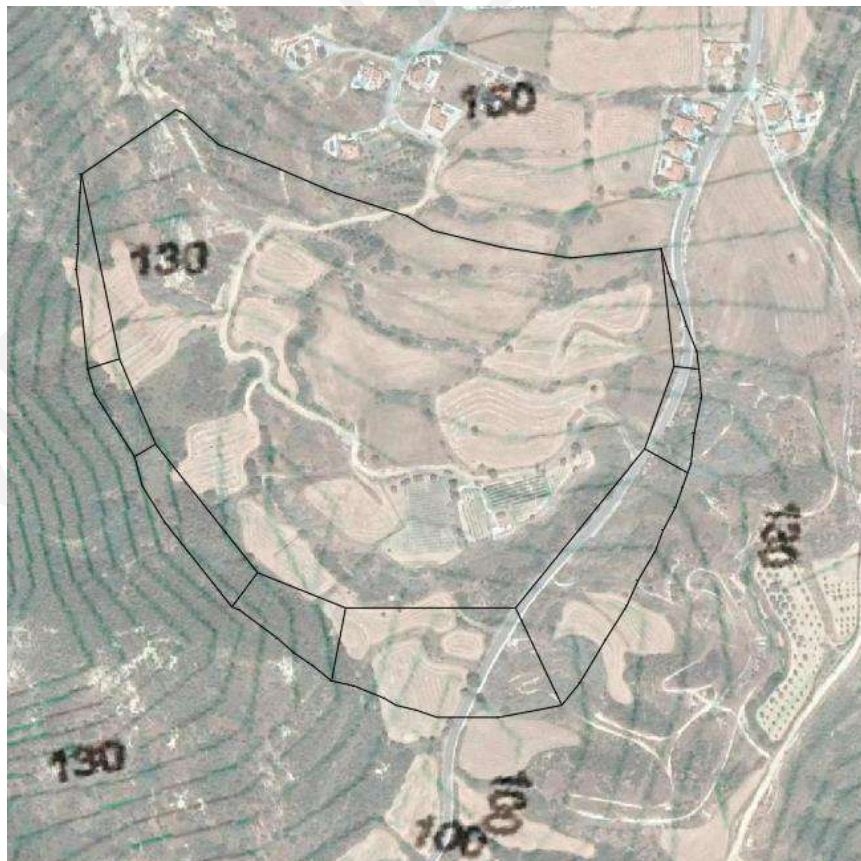
Ακολούθως σχεδιάστηκαν οι παρατάξεις, με βήμα υψομετρικής διαφοράς 5m, για τα οχτώ πρανή που θα αποτελέσουν την απόληξη του επιχώματος, των οποίων η κλίση ως προς την οριζόντιο είναι 1:2. Σε ορισμένες περιπτώσεις σχεδιάστηκαν περισσότερες (ενδιάμεσες) παρατάξεις επιδιώκοντας μεγαλύτερη ακρίβεια στη χάραξη.



Σχήμα 5.4. Σχεδίαση στέψης επιχώματος 1^ο σεναρίου.



Σχήμα 5.5. Σχεδίαση παρατάξεων και κατάντη ορίων επιχώματος 1^{ου} σεναρίου.

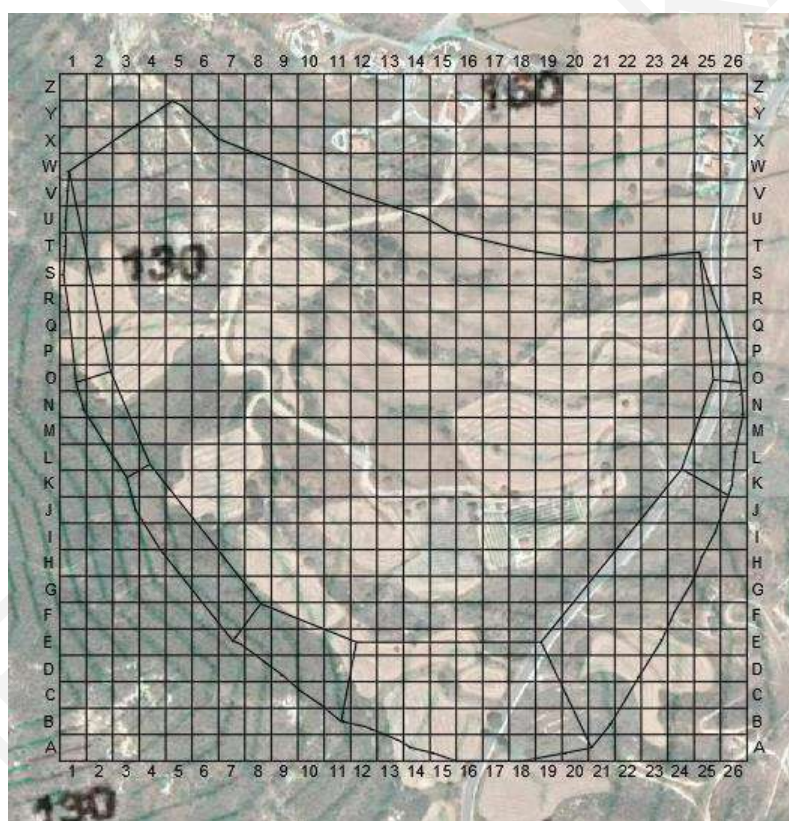


Σχήμα 5.6. Τελική μορφή επιχώματος 1^{ου} σεναρίου.

Τα κατάντη όρια του επιχώματος καθορίστηκαν από τα σημεία συνάντησης των παρατάξεων των πρανών του επιχώματος με τις αντίστοιχες τιμές ισοϋψείς του εδάφους. (Σχήμα 5.5). Η χάραξη της έκτασης του επιχώματος ολοκληρώνεται με τη δυτική οριογραμμή του επιχώματος η οποία ταυτίζεται με την ισοϋψή των 145m, όπου η οριζόντια επιφάνεια του επιχώματος συναντά το ανάγλυφο του φυσικού εδάφους (Σχήμα 5.6).

5.1.2 Ογκομέτρηση επιχώματος

Την ολοκλήρωση της διαδικασίας σχεδίασης του επιχώματος ακολούθησε η ογκομέτρηση του ώστε στη συνέχεια να υπολογιστεί το κόστος κατασκευής του. Στο πλαίσιο της ογκομέτρησης του επιχώματος δημιουργήθηκε ένας κάνναβος, αποτελούμενος από 676 τετραγωνικούς τομείς με πλάτος 20m ο καθένας (Σχήμα 5.7).



Σχήμα 5.7. Δημιουργία καννάβου για σκοπούς ογκομέτρησης του επιχώματος.

Σε κάθε έναν από τους τετραγωνικούς τομείς που περιελάμβανε ένα τμήμα του επιχώματος γίνονταν εκτίμηση του μέσου υψομέτρου της άνω και της κάτω παρειάς του επιχώματος. Η άνω παρειά αποτελεί τμήμα της ελεύθερης επιφάνειας του επιχώματος και η κάτω παρειά αποτελεί τμήμα της επιφάνειας επαφής του επιχώματος με το φυσικό έδαφος. Η διαφορά των μέσων υψομέτρων άνω και κάτω παρειάς αποτελεί το μέσο πάχος h_i του

τμήματος του επιχώματος που βρίσκεται στον αντίστοιχο τομέα i . Επιπρόσθετά, μετρήθηκε το εμβαδόν A_i της περιοχής που καταλαμβάνεται σε οριζοντιογραφία από το επίχωμα σε κάθε τομέα. Ο όγκος επιχώματος που αντιστοιχεί στον εκάστοτε τομέα υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας αυτό το εμβαδόν A_i με το μέσο πάχος h_i . Ο συνολικός όγκος του επιχώματος προκύπτει αθροίζοντας τους όγκους όλων των τομέων του καννάβου που καταλαμβάνονται από το επίχωμα. Χρησιμοποιώντας την παραπάνω μεθοδολογία, ο συνολικός όγκος του επιχώματος του 1^{ου} σεναρίου υπολογίστηκε σε 2724008m³.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνουν δυο επισημάνσεις σε ότι αφορά την προσδοκώμενη επίδοση του επιχώματος. Πρώτον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, στην περίπτωση που το κατάντη άκρο της επιφάνειας ολίσθησης της παλαιοκατολίσθησης είναι 300m δυτικότερα από τη θέση που θεωρήθηκε παραπάνω, το επίχωμα θα βρίσκεται σε επαφή μόνο με ένα πολύ μικρό μέρος της ολισθαίνουσας μάζας και κατά συνέπεια η αύξηση του συντελεστή ασφαλείας θα είναι αμελητέα. Σε αυτό το ενδεχόμενο (το οποίο όμως κρίνεται μικρής πιθανότητας) θα πρέπει να επεκταθεί το επίχωμα ακόμη περισσότερο προς τα δυτικά και να αυξηθεί το ύψος του, οδηγώντας σε πολύ μεγαλύτερο όγκο από ότι υπολογίστηκε παραπάνω.

Δεύτερον, λόγω του μεγάλου μήκους της ολισθαίνουσας μάζας και της σχετικά σημαντικής παραμορφωσιμότητας της μάργας, η ολοκλήρωση της κατασκευής του επιχώματος δεν συνεπάγεται την άμεση παύση των μετατοπίσεων. Αντίθετα, θα απαιτηθεί κάποιο χρονικό διάστημα για την πλήρη ανάπτυξη και μετάδοση των απαιτούμενων σταθεροποιητικών δυνάμεων σε όλη την έκταση της κατολίσθησης, κατά το οποίο θα συνεχίσουν να αναπτύσσονται μετατοπίσεις με φθίνοντα ρυθμό, κυρίως στη ζώνη απομείωσης της κατολίσθησης. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων 10 και 34 (που είναι αντιπροσωπευτικές της τρέχουσας κατάστασης) είναι ενδεικτικά του πόσο δύναται να συμπιεστεί διαμήκως η ολισθαίνουσα μάζα (Σχήματα Π10 και Π34, αντίστοιχα) με σχεδόν ακινητοποιημένο τον πόδα. Στα σχήματα παρατηρείται ότι η μετατόπιση στην κεφαλή είναι μεγαλύτερη από τη μετατόπιση στον πόδα κατά περίπου 1.5m-2.0m. Αν θεωρηθεί ότι οι μετατοπίσεις που θα αναπτυχθούν στη ζώνη απομείωσης από τη στιγμή της ολοκλήρωσης του επιχώματος μέχρι την ακινητοποίηση της ολισθαίνουσας μάζας είναι αυτής της τάξεως (π.χ. 1.5m-2m), τότε, με τους τρέχοντες ετήσιους ρυθμούς μετατοπίσεων

(~50-100cm/yr), η χρονική διάρκεια της εκδήλωσής τους αναμένεται να είναι 3 με 8 χρόνια.

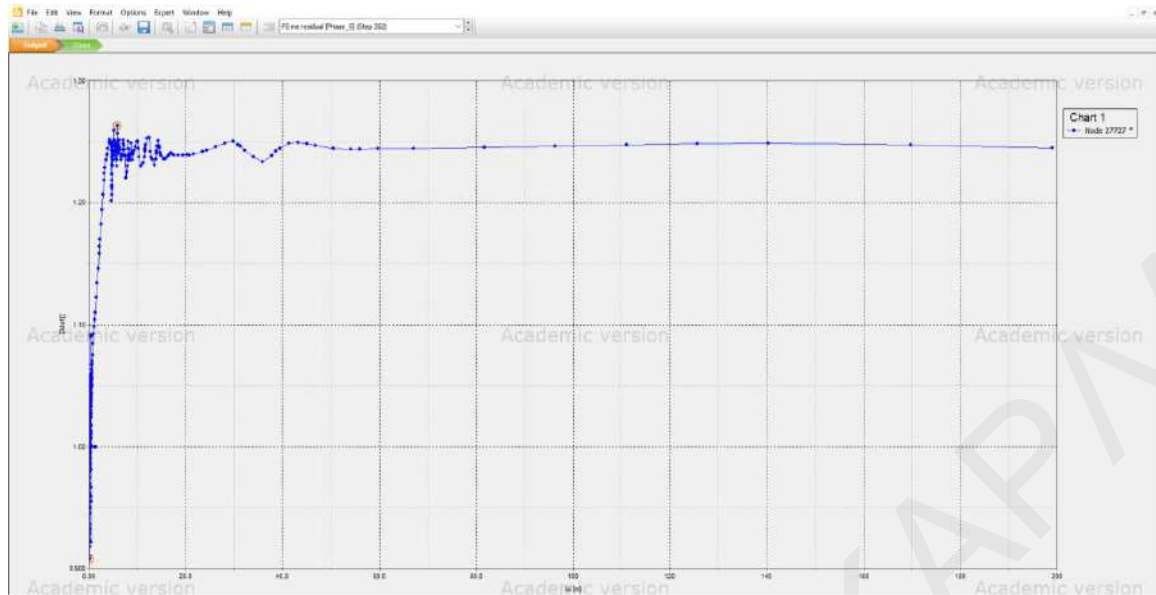
5.2 Σταθεροποίηση με συνδυασμό επιχώματος ποδός και ταπείνωσης φρεάτιου ορίζοντα

Το 2^ο σενάριο προτεινόμενων μέτρων σταθεροποίησης αφορά στη συνδυαστική δράση ενός επιχώματος και ενός πλήθους γεωτρήσεων άντλησης των υπογείων υδάτων με σκοπό την ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα κατά 4m.

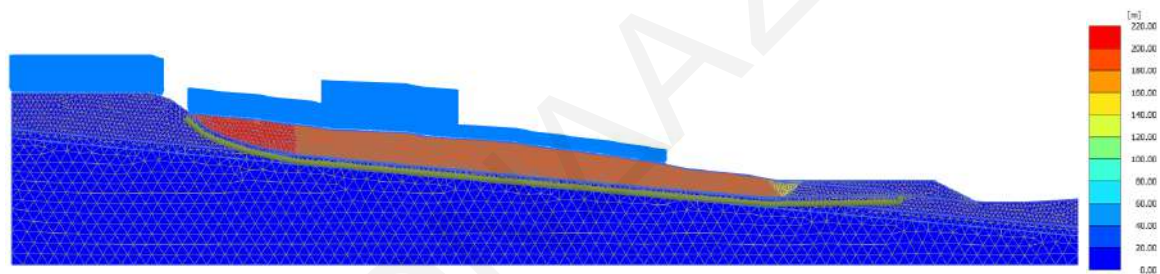


Σχήμα 5.8. Τομή της περιοχής της κατολίσθησης μετά την τοποθέτηση του επιχώματος του 2^{ου} σεναρίου μέτρων σταθεροποίησης.

Το επίχωμα σε αυτή την περίπτωση θα έχει μήκος 300m επί της τομής ανάλυσης και ύψος 31.5m (Σχήμα 5.8). Ο φρεάτιος ορίζοντας που εισάγεται στο προσομοίωμα Plaxis είναι 4m χαμηλότερα από ότι στο 1^ο σενάριο σε όλη την έκταση της κατολίσθησης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του συγκεκριμένου μοντέλου στο πρόγραμμα Plaxis 2D φαίνονται στα Σχήματα 5.9 και 5.10. Η καμπύλη εξέλιξης του ΣΜsf καταλήγει σε έναν επίπεδο κλάδο με τιμή 1.25 (Σχήμα 5.9). Στο Σχήμα 5.10 απεικονίζεται η κατανομή των μετατοπίσεων που έχουν αναπτυχθεί στο προσομοίωμα μέχρι το πέρας της φάσης Safety, οι οποίες αποτυπώνουν την έκταση και γεωμετρία του δυνητικού μηχανισμού αστοχίας παρουσία του επιχώματος. Όπως και στην περίπτωση του 1^{ου} σεναρίου, λόγω της ύπαρξης του επιχώματος ο μηχανισμός αστοχίας σταματάει σχεδόν εκεί που αρχίζει το επίχωμα, όπου και αναδύεται μια νέα ζώνη διάτμησης μέσα από την «αδιατάρακτη» μάργα.



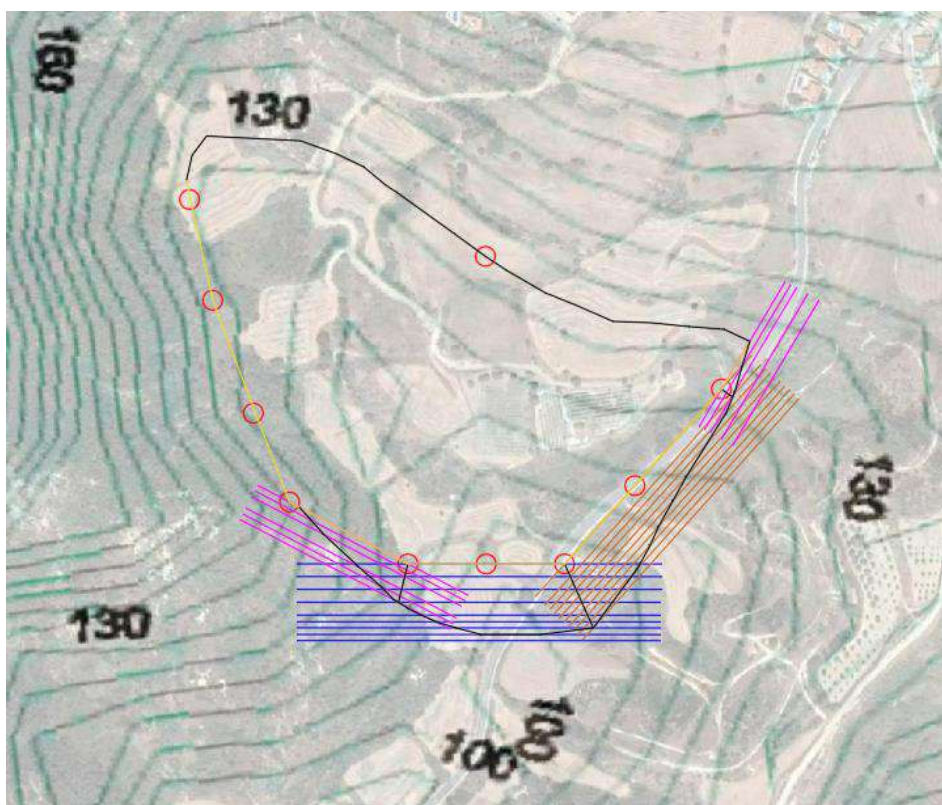
Σχήμα 5.9. Γράφημα εξέλιξης διαίρετη διατμητικής αντοχής ΣMsf – μετατοπίσεως u από ανάλυση με σταθεροποιητικό επίχωμα ποδός και ταπείνωση του φρεάτιου ορίζοντα.



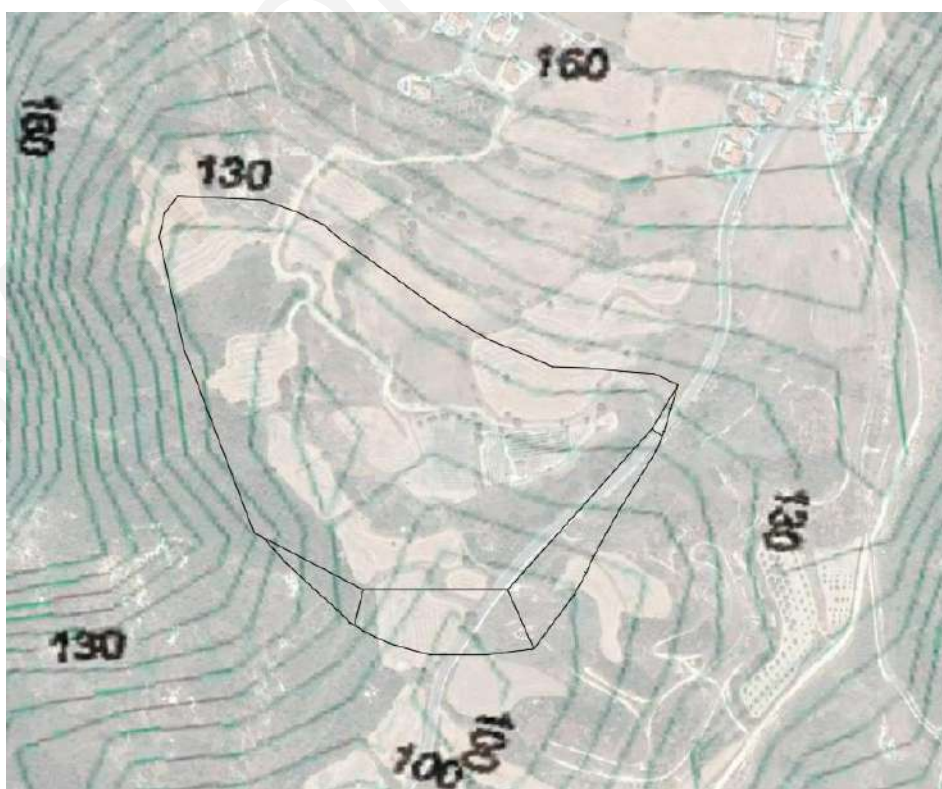
Σχήμα 5.10. Διάγραμμα μετατοπίσεων από ανάλυση με σταθεροποιητικό επίχωμα ποδός και ταπείνωση του φρεάτιου ορίζοντα.

5.2.1 Σχεδίαση επιχώματος

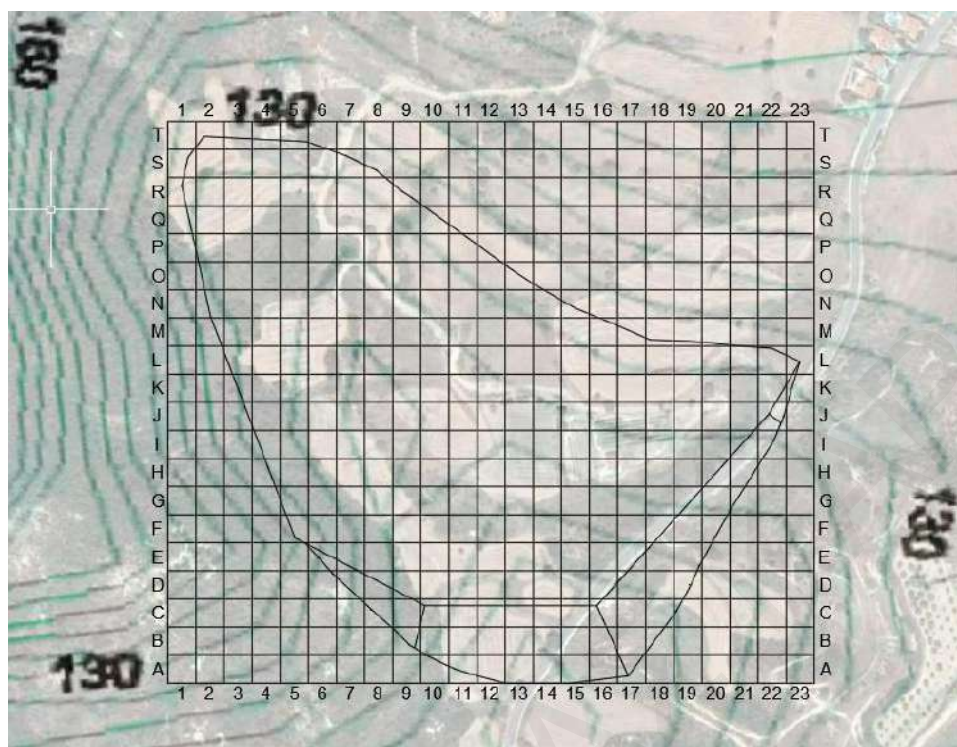
Το επίχωμα που προβλέπεται να κατασκευαστεί σύμφωνα με το 2^ο σενάριο μέτρων σταθεροποίησης σχεδιάστηκε ακολουθώντας την ίδια ακριβώς διαδικασία με αυτή που περιγράφηκε για το επίχωμα του 1^{ου} σεναρίου. Το υψόμετρο της οριζόντιας ελεύθερης επιφάνειας του επιχώματος είναι 127.5m και οι κλίσεις των πρανών του 1:2. Η χάραξη της στέψης του επιχώματος και οι παρατάξεις των πρανών του δίνονται στο Σχήμα 5.11. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι στο νότιο τμήμα της κατολίσθησης δεν χρειάζεται να δημιουργηθούν πρανή στο επίχωμα λόγω της μορφολογίας του εδάφους. Στο συγκεκριμένο τμήμα τα υλικά που θα μεταφερθούν για την δημιουργία του επιχώματος θα γεμίσουν πλήρως τον διαθέσιμο χώρο μεταξύ του πόδα της κατολίσθησης και της απέναντι ράχης. Η τελική μορφή του επιχώματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.12.



Σχήμα 5.11. Σχεδίαση των ορίων του επιχώματος του 2^{ου} σεναρίου σταθεροποιητικών μέτρων.



Σχήμα 5.12. Τελική μορφή επιχώματος του 2^{ου} σεναρίου σταθεροποιητικών μέτρων.



Σχήμα 5.13. Δημιουργία καννάβου για την ογκομέτρηση του επιχώματος του 2^{ου} σεναρίου σταθεροποιητικών μέτρων.

5.2.2 Ογκομέτρηση επιχώματος

Για την ογκομέτρηση του επιχώματος δημιουργήθηκε ένας κάνναβος που αποτελείται από 460 τετραγωνικούς τομείς, κάθε ένας από τους οποίους είχε πλάτος 20m. Ο κάνναβος που προέκυψε τοποθετήθηκε πάνω στο επίχωμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.13. Η εκτίμηση του όγκου του επιχώματος έγινε ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με αυτή που περιγράφηκε κατά τον υπολογισμό του όγκου του επιχώματος του 1^{ου} σεναρίου. Ο συνολικός όγκος για το επίχωμα του 2^{ου} σεναρίου είναι 746714m³.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, στην περίπτωση που το κατάντη άκρο της επιφάνειας ολίσθησης της παλαιοκατολίσθησης είναι στα 300m δυτικότερα από τη θέση που θεωρήθηκε παραπάνω (γεγονός που προϋποθέτει ότι $\phi_R \leq 10^\circ$), το επίχωμα δεν θα βρίσκεται σε επαφή με την ολισθαίνουσα μάζα και δεν θα συνεισφέρει στην ευστάθεια της κατολίσθησης. Αν ισχύει αυτό, τότε όπως σχολιάστηκε στο προηγούμενο σταθεροποιητικό σενάριο, θα πρέπει το επίχωμα να επεκταθεί περισσότερο προς τα δυτικά και να αυξηθεί το ύψος του, οδηγώντας σε πολύ μεγαλύτερο όγκο.

5.2.3 Απαιτούμενος αριθμός αντλητικών γεωτρήσεων

Οι γεωτρήσεις που θα χρειαστεί να κατασκευαστούν για την άντληση των υδάτων με σκοπό την ταπείνωση του φρεάτιου υδροφόρου ορίζοντα κατά 4m πρέπει να είναι μεγάλης διαμέτρου («φρέατα») ώστε να έχουν μεγάλη απόδοση. Οι γεωτρήσεις θα έχουν όλες τα ίδια γεωμετρικά και τεχνικά χαρακτηριστικά. Η κάθε γεώτρηση θα έχει διάμετρο 55.9cm (22 ίντσες) και βάθος 17m. Εν συνεχεία θα τοποθετηθεί σωλήνας μικρότερης διαμέτρου, περίπου 20cm (8 ιντσών), διάτρητος στο κάτω μέρος του. Στο κατώτερο τμήμα της γεώτρησης, στα 16m βάθος, θα τοποθετηθεί η αντλία, ενώ ο κενός χώρος μεταξύ του σωλήνα διαμέτρου 20cm και των τοιχωμάτων της γεώτρησης θα πληρωθεί με χαλίκι (φίλτρο). Για προστασία, θα γίνει τοποθέτηση περιφραγματικού σωλήνα μέχρι το βάθος των 3m. Αξίζει να αναφερθεί ότι επιλέχθηκε το βάθος των γεωτρήσεων να μην υπερβαίνει τα 17m ώστε να μειωθούν όσο το δυνατόν οι πιθανότητες να σπάσουν οι γεωτρήσεις και να πάψουν να είναι λειτουργικές λόγω των μετακινήσεων του εδάφους που θα συμβούν μέχρι να επιτευχθεί η σταθεροποίηση της κατολίσθησης.

Με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα που παρατίθενται στην Ενότητα 2.2, θεωρήθηκε ετήσια βροχόπτωση στην περιοχή του Πισσουρίου της τάξης των 500mm, τιμή η οποία μπορεί να καταγραφεί κυρίως κατά την διάρκεια βροχερών ετών. Η επιλογή αυτή αποτελεί μια συντηρητική προσέγγιση, δεδομένου ότι η μέση ετήσια βροχόπτωση στο Πισσούρι εκτιμάται στα 400mm. Οι βροχοπτώσεις στην Κύπρο είναι αρκετά έντονες, με συνέπεια μόλις ένα σχετικά μικρό ποσοστό των κατακρημνίσεων να εισέρχεται στο υπέδαφος, παρά το δίκτυο ρηγματώσεων στην επιφάνεια της ολισθαίνουσας μάζας. Συνεπώς, ο συντελεστής κατεισδυσής θεωρήθηκε ίσος με 15%. Με αυτά τα δεδομένα το νερό που κατεισδύει σε ετήσια βάση στο υπέδαφος λόγω των βροχοπτώσεων έχει ύψος $0.5 \times 0.15 = 0.075\text{m}$

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες, εκτός από το νερό της βροχής στο έδαφος της περιοχής καταλήγει και το νερό των οικιακών καταναλώσεων. Η ημερήσια κατά κεφαλή κατανάλωση θεωρήθηκε ότι ανέρχεται σε 250 λίτρα. Αν και τα στοιχεία του Συμβουλίου Υδατοπρομήθειας Λεμεσού, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1, δίνουν 160.9 λίτρα ως μέση ημερήσια κατά κεφαλή κατανάλωση στην πόλη της Λεμεσού, επιλέχθηκαν τα 250 λίτρα διότι το Πισσούρι δεν είναι μια περιοχή μεγάλου αστικού κέντρου. Αντίθετα, στο Πισσούρι υπάρχουν κυρίως μονοκατοικίες αναψυχής με κήπους και αρκετές πισίνες, οπότε οι ανάγκες για νερό είναι σημαντικά μεγαλύτερες.

Πίνακας 5.1. Στοιχεία κατανάλωσης νερού για την πόλη της Λεμεσού από το 2011 έως το 2017, όπως καταγράφηκαν από το Συμβούλιο Υδατοπρομήθειας Λεμεσού.

Έτος	Μέση ημερήσια κατά κεφαλή κατανάλωση (λίτρα)
2011	163
2012	164
2013	157
2014	155
2015	158
2016	160
2017	169
Μέσος όρος	160.9

Στην περιοχή της παλαιοκατολίσθησης καταγράφηκαν συνολικά 276 όροφοι κατοικιών με συνολικό δομημένο εμβαδόν σχεδόν 90000m². Κάνοντας την υπόθεση ότι σε κάθε 100m² διαμένει 1 άτομο κατά μέσο όρο κατά τη διάρκεια του έτους (δεδομένου ότι τα περισσότερα κτίσματα αποτελούν κατοικίες αναψυχής), η συνολική ετήσια οικιακή κατανάλωση εκτιμάται ως ακολούθως:

Ετήσια οικιακή κατανάλωση

$$\begin{aligned}
 &= 90000m^2 * \frac{1\text{κάτοικος}}{100m^2} * 0.25 \frac{m^3}{\text{κάτοικο την ημέρα}} * 365\text{ημέρες} \\
 &= 82125m^3
 \end{aligned}$$

Αν η ποσότητα της ετήσιας οικιακής κατανάλωσης, η οποία καταλήγει σχεδόν στο σύνολό της στο υπέδαφος μέσω των απορροφητικών λάκκων και των αρδεύσεων, αναχθεί στο εμβαδόν 460 στρεμμάτων της έκτασης της παλαιοκατολίσθησης, η ετήσια συνεισφορά σε ανύψωση του φρεάτιου ορίζοντα είναι

$$\frac{82125m^3}{460000m^2} = 0.18m$$

και προσθέτοντας σε αυτό την καείσδυση των ομβρίων υδάτων, ανέρχεται τελικά σε 0.25m.

Η ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα θα πρέπει να επιτευχθεί σε ένα σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, καθώς σε διαφορετική περίπτωση ενδέχεται να παρουσιαστούν μεγαλύτερες καταστροφές ακόμη και εκτός της τρέχουσας περιοχής της κατολίσθησης.

Αυτό το χρονικό διάστημα θα πρέπει να είναι αντίστοιχης τάξης μεγέθους με την διάρκεια κατασκευής του επιχώματος, π.χ. 2-3 χρόνια.

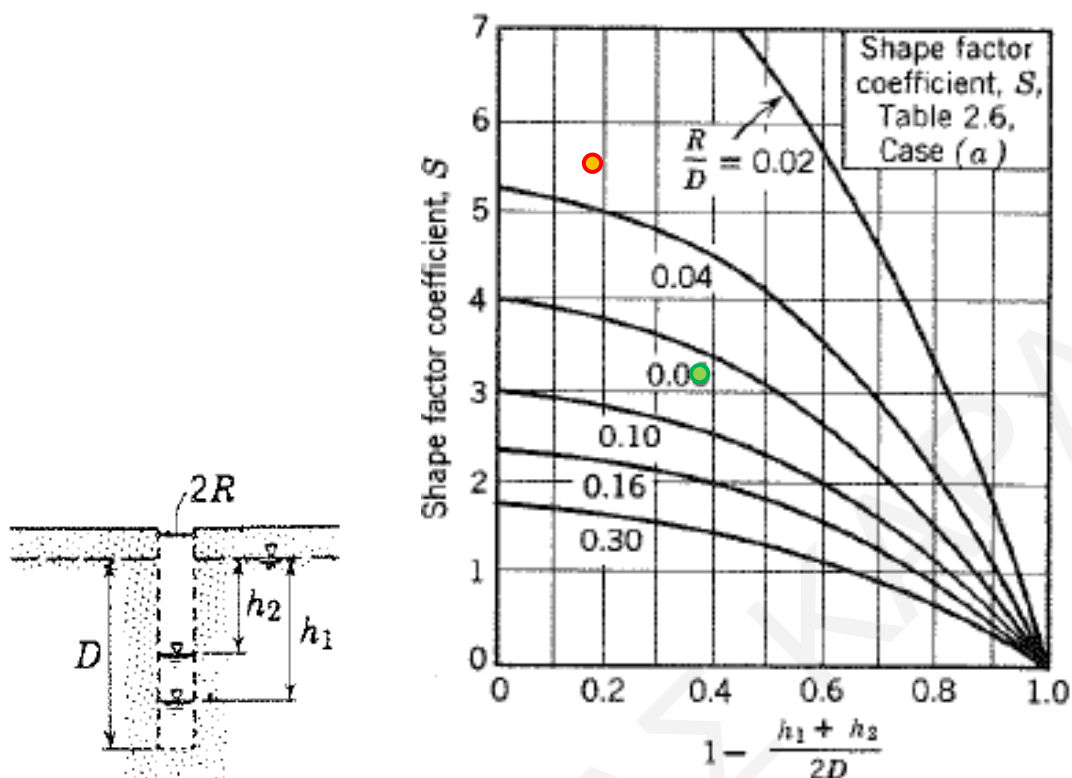
Στο πλαίσιο εκτίμησης του απαιτούμενου αριθμού αντλητικών γεωτρήσεων, θεωρήθηκε ότι η μέση στάθμη του υδροφόρου σε ετήσια βάση εντοπίζεται σε βάθος 8m από την επιφάνεια του εδάφους και η επιδίωξη είναι να κατέβει στα 12m. Δεδομένου ότι το βάθος της αντλίας είναι 16m και αγνοώντας (συντηρητικά) το 1m που έπεται μέχρι τον πυθμένα της γεώτρησης, το αρχικό παραγωγικό ύψος D (Σχήμα 5.14) λαμβάνεται ίσο με 8m.

Οι μάργες του σχηματισμού Λευκωσίας, όντας αργιλικά εδάφη μεγάλης πλαστικότητας, έχουν πολύ μικρή υδραυλική διαπερατότητα. Οι Lazarou et al. (2019) μέτρησαν σε δοκιμές flexible wall permeameter σε αδιατάρακτα και ακέραια δείγματα καστανής μάργας από την περιοχή της πόλης της Λευκωσίας τιμή συντελεστή υδραυλικής διαπερατότητας k της τάξης των 10^{-9} m/s. Εντούτοις, η μάργα που αποτελεί την ολισθαίνουσα μάζα στην εξεταζόμενη κατολίσθηση είναι έντονα ρηγματωμένη σε όλες τις διευθύνσεις με αποτέλεσμα η διαπερατότητα να είναι πολύ μεγαλύτερη. Σύμφωνα με τον Barnes (2016), ρηγματωμένες άργιλοι μπορεί να έχουν k στο εύρος 10^{-9} - 10^{-4} m/sec, ανάλογα με το βαθμό ρηγμάτωσης. Με βάση αυτό, η διαπερατότητα του εδαφικού σχηματισμού στην κατολισθημένη μάζα εκτιμάται στα 10^{-6} m/sec. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι Lazarou et al. (2019) βρήκαν ότι η επιτόπου διαπερατότητα μάργας Λευκωσίας στην επιφανειακή ζώνη, όπου υπάρχει έντονο δίκτυο ρηγματώσεων λόγω εποχιακής ξήρανσης, είναι τουλάχιστον δυο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από ότι σε ακέραια δείγματα σε δοκιμές flexible wall permeameter στο εργαστήριο (4.05×10^{-7} m/s έναντι 2.6×10^{-9} m/s).

Λόγω της μικρής διαπερατότητας του εδάφους, οι αντλίες δεν θα μπορούν να δουλεύουν συνεχώς αλλά θα ενεργοποιούνται κατά διαστήματα, οπότε και θα αδειάζουν γρήγορα τη γεώτρηση. Στο χρονικό διάστημα Δt που μεσολαβεί μεταξύ των φάσεων άντλησης, το νερό από τον υδροφόρο ορίζοντα θα ξαναγεμίζει κατά ύψος Δh ($=h_2-h_1$) τη γεώτρηση. Η εξίσωση που συνδέει τα Δh και Δt είναι η ακόλουθη (Cedergren, 1997):

$$\Delta h = \frac{16 * D * S * k}{R} * \Delta t \quad (\text{Εξ. 5.1})$$

όπου R η ακτίνα της γεώτρησης και S μια σταθερά, η οποία προκύπτει από το γράφημα του Σχήματος 5.14. Στην προκειμένη περίπτωση, όπου πρακτικά αδειάζει η γεώτρηση με κάθε φάση άντλησης, $h_1=D$ και $h_2=D-\Delta h$.



Σχήμα 5.14. Γράφημα εκτίμησης του συντελεστή σχήματος S (από Cedergren, 1997). Τα κυκλικά σύμβολα στο γράφημα δείχνουν τις τιμές S στην έναρξη και στο τέλος της διαδικασίας καταβίβασιμου του φρεατίου ορίζοντα για το 2^ο σενάριο σταθεροποιητικών μέτρων.

Για να είναι μεγάλη η απόδοση της γεώτρησης, θα πρέπει η στάθμη του νερού στο εσωτερικό της να κρατιέται χαμηλά ώστε να υπάρχει συνεχώς σημαντική υδραυλική κλίση μεταξύ ελεύθερου πεδίου και γεώτρησης. Αν τεθεί ως όριο για την έναρξη άντλησης η άνοδος της στάθμης να είναι $\Delta h = 3\text{m}$, τότε με δεδομένο ότι $R = 0.56/2 = 0.28\text{m}$, $D = 8\text{m}$ και $k = 10^{-6}\text{m/s}$, ο συντελεστής S προκύπτει ίσος με 5.6 από το γράφημα του Σχήματος 5.14, και λύνοντας την εξίσωση 5.1 ως προς Δt προκύπτει ότι η άνοδος 3m της στάθμης θα χρειαστεί 1169sec, δηλαδή πρακτικώς 20min (1200sec).

Για διάμετρο της γεώτρησης 55.9cm, το μεικτό εμβαδόν της διατομής της είναι

$$A_{\text{γεωτ}} = \frac{\pi * (0.559\text{m})^2}{4} = 0.25\text{m}^2$$

Το ωφέλιμο εμβαδόν της διατομής αντιστοιχεί στο εμβαδόν της διατομής της γεώτρησης που γεμίζει με νερό, δηλαδή το νερό που συγκεντρώνεται στον εσωτερικό σωλήνα και το νερό που βρίσκεται εντός των πόρων του χαλκίφιλτρου της γεώτρησης. Ο εσωτερικός σωλήνας που χρησιμοποιείται είναι 20cm και υποθέτοντας ότι το φίλτρο της γεώτρησης

έχει πορώδες 0.44 (ομοιόμορφο θραυστό υλικό λατομείου με δείκτη πόρων 0.8), το ωφέλιμο εμβαδόν διατομής προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$A_{\omega\phi\epsilon\lambda} = \frac{\pi * (0.2m)^2}{4} + \left(0.25 - \frac{\pi * (0.2m)^2}{4}\right) * 0.44 = 0.13m^2$$

Επομένως, ο όγκος του νερού που θα βγάξει η αντλία σε διάστημα μιας ημέρας θα ανέρχεται σε

$$Q_{ini} = \frac{3m * 0.13 m^2}{1200 sec} * (3600 sec * 24) = 28m^3$$

Η παραπάνω τιμή αφορά την αρχική περίοδο της λειτουργίας του δικτύου αντλητικών γεωτρήσεων, με το D να είναι πρακτικά 8m. Προς το τέλος της διαδικασίας ταπείνωσης του φρεάτιου ορίζοντα κατά 4m μετά από χρόνια, το D θα είναι 4m. Επαναλαμβάνοντας τους υπολογισμούς για D=4m, το S μειώνεται σε 3.15 και ο χρόνος αναπλήρωσης των 3m ύψος νερού στη γεώτρηση αυξάνεται στα 4156sec (δηλ. 1ώρα και 9λεπτά). Ως αποτέλεσμα, ο όγκος που θα αποδίδει κάθε γεώτρηση στη διάρκεια μιας ημέρας πέφτει στα $Q_{fm}=7.9m^3$. Οπότε, με βάση τα παραπάνω γίνεται η υπόθεση ότι κατά μέσο όρο σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας καταβίβασμού του φρεάτιου ορίζοντα, η κάθε γεώτρηση αποδίδει ημερησίως $18m^3$.

Θέτοντας ως στόχο το κατέβασμα του φρεάτιου ορίζοντα κατά 4m εντός 3-ετίας, ο όγκος του νερού που θα πρέπει να αντλείται σε ημερήσια βάση σε έκταση 550 στρεμμάτων (η οποία πέρα από τα 460 στρέμματα της παλαιοκατολίσθησης περιλαμβάνει και μια περιβάλλουσα ζώνη έτσι ώστε η υδραυλική κλίση και οι δυνάμεις διήθησης στα σύνορα της παλαιοκατολίσθησης να μην είναι υψηλές) είναι

$$\frac{550000m^2 * 4m}{3 * 365 days} = 2009 \frac{m^3}{day}$$

Σε αυτά θα πρέπει να προστεθούν τα $0.25 \times 550000 / 365 = 377m^3$ την ημέρα από τη συνεχιζόμενη οικιακή κατανάλωση και την κατείδυση νερών της βροχής. Συνεπώς, ο αριθμός των γεωτρήσεων που απαιτείται για την άντληση των $2386m^3$ νερού την ημέρα, με τον όγκο του νερού που κάθε αντλία θα μπορεί να τραβήξει σε διάστημα μιας ημέρας κατά μέσο όρο ίσο με $18m^3$, ανέρχεται σε

$$N_{\gamma\epsilon\omega\tau} = \frac{2386 \frac{m^3}{day}}{18 \frac{m^3}{day}} = 133$$

με τις αποστάσεις μεταξύ τους (spacing) σε έναν κατά προσέγγιση τετραγωνικό κάναβο να είναι

$$S = \sqrt{\frac{550000m^2}{133 \text{ γεωτρήσεις}}} = 64m$$

Επιπρόσθετα γίνεται εκτίμηση της ακτίνας επιρροής των γεωτρήσεων εφαρμόζοντας τις σχέσεις που πρότειναν ο Sichardt και ο Kusakin. Σύμφωνα με την εξίσωση Sichardt, η ακτίνα επιρροής είναι

$$R = 3000 * 8 * \sqrt{10^{-6}} = 24m$$

ενώ με βάση την εξίσωση Kusakin η ακτίνα επιρροής με το πέρας ενός έτους θα είναι

$$R = 1.9 * \sqrt{\frac{8 * 10^{-6} * 3600 * 24 * 365}{0.4}} = 47.7m$$

Από τον μέσο όρο των τιμών αυτών, η ακτίνα επιρροής κάθε γεώτρησης αναμένεται να είναι περίπου 36m. Η ακτίνα 36m είναι μεγαλύτερη από την μεσαπόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων (64/2=32m) και ως αποτέλεσμα θα υπάρξει μια αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Εντούτοις, η αλληλοεπικάλυψη είναι μικρή και κατά συνέπεια η θεωρία στην οποία βασίζεται η Εξ. 5.1, η οποία θεωρεί μεμονωμένη γεώτρηση, συνεχίζει να ισχύει σε μεγάλο βαθμό.

5.2.4 Καθιζήσεις λόγω αντλήσεων

Η ταπείνωση του φρεάτιου ορίζοντα αναπόφευκτα θα προκαλέσει καθιζήσεις σε όλη την επίμαχη περιοχή λόγω της μείωσης της πίεσης πόρων και τη συνεπαγόμενη αύξηση της κατακόρυφης ενεργού τάσης, η οποία με τη σειρά της θα προξενήσει κατακόρυφες παραμορφώσεις εντός της μάργας. Συγκεκριμένα, η ταπείνωσή κατά 4m της στάθμης του υπογείου νερού προκαλεί μείωση της πίεσης πόρων Δu (ή αύξηση της αρνητικής πίεσης πόρων πάνω από τον φρεάτιο ορίζοντα) κατά 40kPa και, κατά συνέπεια, αύξηση της

κατακόρυφου ενεργού τάσεως $\Delta\sigma'_v$ κατά 40kPa σε όλο το πάχος της μάργας που βρίσκεται κάτω από τον φρεάτιο ορίζοντα καθώς και στη ζώνη τριχοειδούς ανύψωσης, όπου το έδαφος είναι πρακτικά κορεσμένο. Το άνω όριο της ζώνη τριχοειδούς ανύψωσης θεωρείται εδώ ότι βρίσκεται στα 4m βάθος, πάνω από τα οποία ξεκινάει η ενεργός ζώνη (το ανώτερο τμήμα του εδαφικού προφίλ όπου η περιεχόμενη υγρασία καθορίζεται από τους ατμοσφαιρικούς παράγοντες).

Η μάργα του σχηματισμού Λευκωσίας αποτελεί στην ουσία μια υπερστερεοποιημένη άργιλο, με φαινόμενη τάση υπερστερεοποίησης της τάξης των 500kPa-1500kPa, σύμφωνα με δεδομένα από την περιοχή της Λευκωσίας (Hobbs et al., 1986). Επομένως, η μεταβολή του δείκτη πόρων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta e = C_s * \log \frac{\sigma'_{v_0} + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_{v_0}} \quad (\text{Εξ. 5.2})$$

και η αντίστοιχη κατακόρυφη παραμόρφωση από τη σχέση:

$$\Delta\varepsilon_z = \frac{C_s}{1 + e_0} * \log \frac{\sigma'_{v_0} + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_{v_0}} \quad (\text{Εξ. 5.3})$$

όπου C_s ο δείκτης διόγκωσης της θεωρίας στερεοποίησης αργίλων, e_0 ο αρχικός δείκτης πόρων και σ'_{v_0} η αρχική γεωστατική κατακόρυφη ενεργός τάση.

Για τον υπολογισμό της καθίζησης, το στρώμα της μάργας κάτω από την ενεργό ζώνη (δηλαδή κάτω από τα 4m βάθος), το οποίο έχει πάχος περί τα 42m στην κεντρική περιοχή του κυρίως σώματος της κατολίσθησης, χωρίστηκε σε υποστρώματα πάχους 2m. Στο κέντρο κάθε υποστρώματος, υπολογίστηκε η αρχική και η τελική κατακόρυφος ενεργός τάση και στη συνέχεια εκτιμήθηκε η κατακόρυφη παραμόρφωση κάθε υποστρώματος με τον δείκτη πόρων της μάργας να ισούται με 0.8 και τον δείκτη διόγκωσης C_s να είναι 0.05, που αποτελούν τυπικές τιμές για τη μάργα στην περιοχή της πόλης της Λευκωσίας με βάση τα πειραματικά δεδομένα των Hobbs et al. (1986). Τέλος, η καθίζηση w της ελεύθερης επιφάνειας υπολογίζεται ως το άθροισμα για όλα τα υποστρώματα του γινομένου της κατακόρυφης παραμόρφωσης επί το πάχος του εκάστοτε υποστρώματος:

$$w = \sum \Delta w = \sum \Delta\varepsilon_z * \Delta h \quad (\text{Εξ. 5.4})$$

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρατίθενται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2. Υπολογισμός βράχυνσης υποστρωμάτων μάργας λόγω των αντλήσεων που προβλέπει το 2^ο σενάριο σταθεροποιητικών μέτρων.

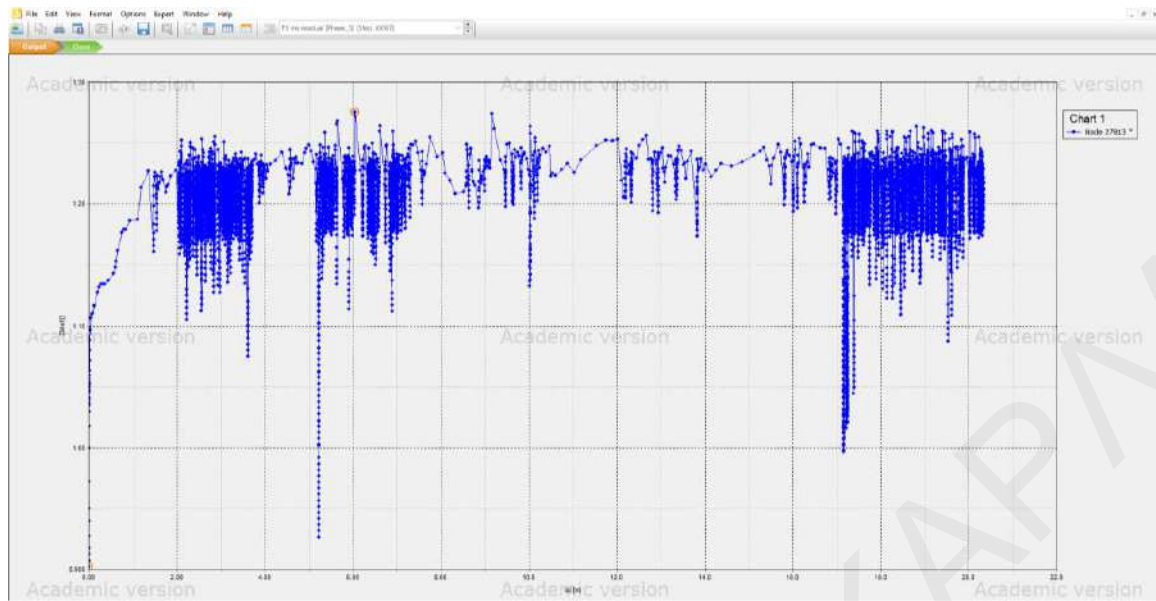
Βάθος (m)	$\sigma_{v0'}$ (kPa)	$\sigma_{v0'} + \Delta\sigma'_v$ (kPa)	$\Delta\varepsilon_z$	Δw (m)
5	125	165	0.003	0.0067
7	143	183	0.003	0.0060
9	161	201	0.003	0.0054
11	179	219	0.002	0.0049
13	197	237	0.002	0.0045
15	215	255	0.002	0.0041
17	233	273	0.002	0.0038
19	251	291	0.002	0.0036
21	269	309	0.002	0.0033
23	287	327	0.002	0.0031
25	305	345	0.001	0.0030
27	323	363	0.001	0.0028
29	341	381	0.001	0.0027
31	359	399	0.001	0.0025
33	377	417	0.001	0.0024
35	395	435	0.001	0.0023
37	413	453	0.001	0.0022
39	431	471	0.001	0.0021
41	449	489	0.001	0.0021
43	467	507	0.001	0.0020
45	485	525	0.001	0.0019
Σύνολο			w=	0.071m

Η συνολική καθίζηση της ελεύθερης επιφάνειας προκύπτει 7cm. Η καθίζηση αυτή δεν είναι απαγορευτική για την υλοποίηση όσων προτείνει το 2^ο σενάριο σταθεροποίησης της κατολίσθησης, αλλά δεν μπορεί να αμεληθεί. Ολικές καθιζήσεις αυτής της τάξης μεγέθους συχνά προκαλούν την εμφάνιση ρωγμών στους τοίχους πληρώσεως των κτιρίων. Για παράδειγμα, ο Ευρωκώδικας 7 θέτει ως αδρό όριο τα 5cm καθίζηση. Από αυτά, 1.5cm με 3.5cm είναι διαφορεική καθίζηση που αποτελεί την άμεση γενεσιουργό αιτία των ρωγμών. Σε αντίθεση όμως με τις καθιζήσεις των κτιρίων λόγω των φορτίων τους, οι οποίες εντοπίζονται εντός της κάτοψης των κτιρίων, με μεγαλύτερες τιμές στο κέντρο του κτιρίου

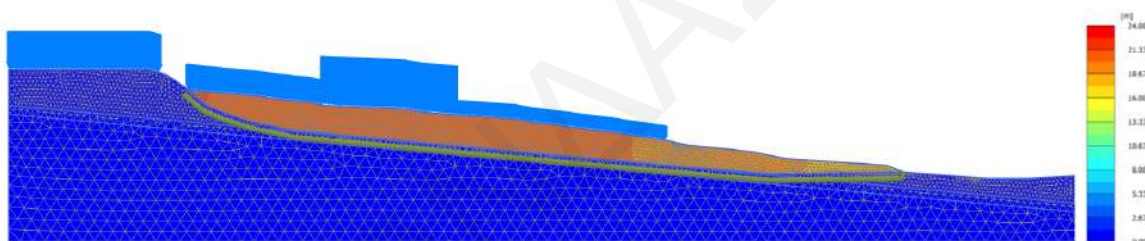
και μικρότερες στην περιμέτρο του (ενώ είναι αμελητέες στον περιβάλλοντα εξωτερικό χώρο), η καθίζηση λόγω των αντλήσεων θα συμβεί παντού. Οπότε σε αυτή την περίπτωση, το ποσοστό της ολικής καθίζησης που θα αποτελεί διαφορική καθίζηση θα είναι μικρότερο από ότι στην περίπτωση καθιζήσεων λόγω των φορτίων ενός κτιρίου. Πάντως, σε κάθε περίπτωση, η καθίζηση λόγω αντλήσεων είναι σαφώς μικρότερη από την οριακή τιμή πέρα από την οποία αρχίζουν να αναπτύσσονται βλάβες στον φέροντα οργανισμό των κτιρίων, η οποία είναι περί τα 15cm. Αντίθετα, οι κατακόρυφες μετατοπίσεις που προκαλεί η συνέχιση της κατολίσθησης είναι τάξεως μεγέθους μεγαλύτερες και ήδη έχουν οδηγήσει όχι μόνο σε βλάβες στα φέροντα στοιχεία των οικοδομών αλλά και σε καταρρεύσεις (π.χ. Σχήμα 1.17). Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ρυθμός ανάπτυξης κατακόρυφων μετατοπίσεων λόγω της κατολίσθησης σε εκτεταμένες περιοχές στη ζώνη απομείωσης και στη ζώνη συσσώρευσης είναι μεγέθους 3cm τον χρόνο κατά απόλυτο τιμή (Hearn et al., 2018). Άρα, οι αντλήσεις αναμένεται να προξενήσουν άπαξ ένα μέγεθος κατακόρυφων μετατοπίσεων που η κατολίσθηση δημιουργεί μόλις κάθε 2 με 3 χρόνια.

5.3 Σταθεροποίηση αποκλειστικά με ταπείνωση φρεάτιου ορίζοντα

Το 3^ο σενάριο για την σταθεροποίηση της κατολίσθησης στο Πισσούρι στηρίζεται αποκλειστικά στη λειτουργία αντλητικών γεωτρήσεων μεγάλης διαμέτρου («φρέατα»), με σκοπό την ταπείνωση του φρεάτιου ορίζοντα κατά 9m. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του συγκεκριμένου μοντέλου στο πρόγραμμα Plaxis 2D φαίνονται στα Σχήματα 5.15 και 5.16. Η καμπύλη εξέλιξης του ΣMsf εμφανίζει έναν επίπεδο κλάδο με τιμή 1.24-1.25 (Σχήμα 5.15), δηλαδή περίπου ίση με τον απαιτούμενο συντελεστή ασφαλείας 1.25. Στο Σχήμα 5.16 απεικονίζεται η κατανομή των μετατοπίσεων που έχουν αναπτυχθεί στο προσομοίωμα μέχρι το πέρας της φάσης Safety, οι οποίες αποτυπώνουν την έκταση και γεωμετρία του δυνητικού μηχανισμού αστοχίας. Εν τη απουσία οπουδήποτε επιχώματος, η κατανομή των μετατοπίσεων είναι παρόμοια με αυτή που παρατηρήθηκε στις αντίστροφες αναλύσεις του Κεφαλαίου 4.



Σχήμα 5.15. Γράφημα εξέλιξης διαίρετη διατμητικής αντοχής ΣMsf – μετατοπίσεως μ από ανάλυση σταθεροποίησης της κατολίσθησης μόνο μέσω ταπείνωσης του φρεάτιου ορίζοντα.



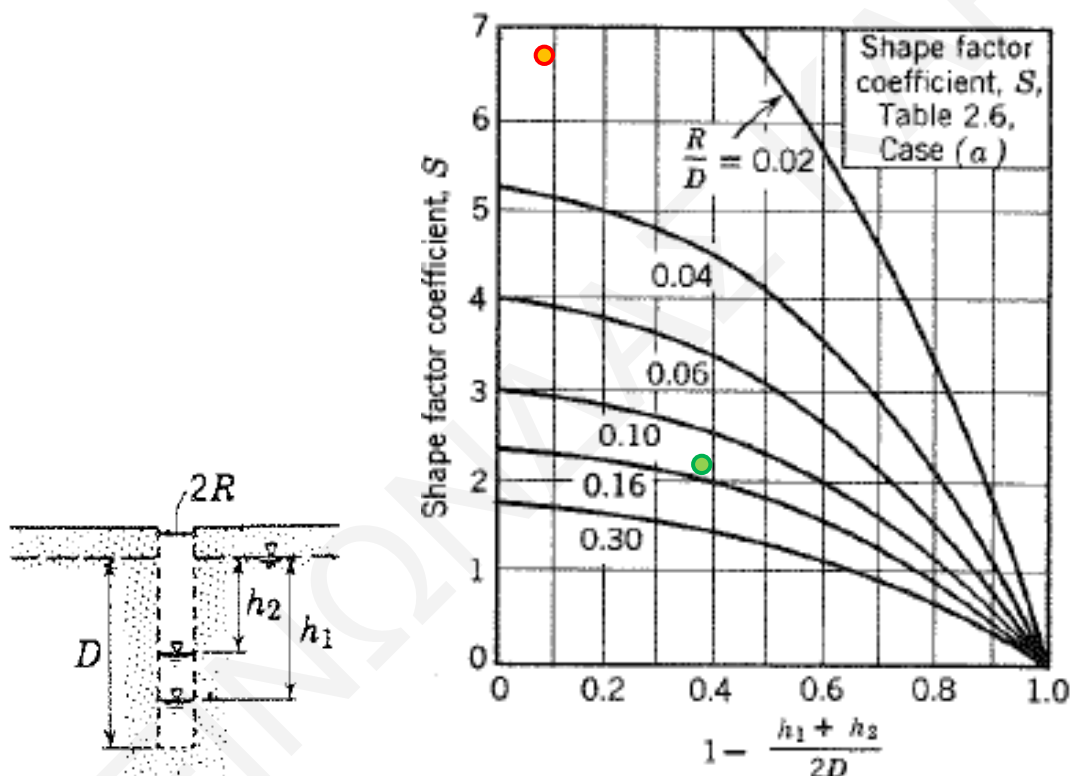
Σχήμα 5.16. Διάγραμμα μετατοπίσεων από ανάλυση σταθεροποίησης της κατολίσθησης μόνο μέσω ταπείνωσης του φρεάτιου ορίζοντα.

5.3.1 Απαιτούμενος αριθμός αντλητικών γεωτρήσεων

Οι γεωτρήσεις του 3^{ου} σεναρίου έχουν την ίδια διάμετρο με αυτές που προτείνονται να χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο του 2^{ου} σεναρίου, δηλαδή 55.9cm, ενώ το βάθος των γεωτρήσεων είναι 20m. Στο εσωτερικό θα τοποθετηθεί σωλήνας διαμέτρου 20cm, διάτρητος στο κάτω μέρος του. Ο χώρος μεταξύ των τοιχωμάτων της γεώτρησης και του εσωτερικού σωλήνα θα πληρωθεί με ομοιόμορφο χαλίκι (φίλτρο). Θα τοποθετηθεί επίσης προστατευτικός περιφραγματικός σωλήνας έως τα 3m βάθος. Η συνολική έκταση της περιοχής στην οποία θα γίνει καταβιβασμός της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα είναι 550 στρέμματα, με τα 460 στρέμματα να είναι η έκταση της παλαιοκατολίσθησης και τα υπόλοιπα να προεκτείνονται στις γειτνιάζουσες περιοχές ώστε να περιοριστούν οι

δυνάμεις διήθησης στα όρια της κατολίσθησης. Όπως εξηγήθηκε στην Ενότητα 5.2, ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας k της μάργας εντός της ολισθαίνουσας μάζας θεωρείται ίσος με 10^{-6} m/s.

Η μέση στάθμη του υδροφόρου σε ετήσια βάση θεωρείται ότι είναι σε βάθος 8m από την επιφάνεια του εδάφους και επιδιώκεται μέσω των αντλήσεων να κατέβει στα 17m. Δεδομένου ότι το βάθος της αντλίας είναι 19m και αγνοώντας (συντηρητικά) το 1m που έπεται μέχρι τον πυθμένα της γεώτρησης, το αρχικό παραγωγικό ύψος D λαμβάνεται ίσο με 11m.



Σχήμα 5.17. Γράφημα εκτίμησης του συντελεστή σχήματος S (από Cedergren, 1997). Τα κυκλικά σύμβολα στο γράφημα δείχνουν τις τιμές S στην έναρξη και στο τέλος της διαδικασίας καταβιβασμού του φρεατίου ορίζοντα για το 3^ο σενάριο σταθεροποιητικών μέτρων.

Για να είναι μεγάλη η απόδοση της γεώτρησης, θα πρέπει η στάθμη του νερού στο εσωτερικό της να κρατιέται χαμηλά ώστε να υπάρχει συνεχώς σημαντική υδραυλική κλίση μεταξύ ελεύθερου πεδίου και γεώτρησης. Αν τεθεί ως όριο για την έναρξη άντλησης η άνοδος της στάθμης να είναι $\Delta h = 1.5$ m, τότε με δεδομένο ότι $k = 10^{-6}$ m/s, $R = 0.28$ m και $D = 11$ m, ο συντελεστής S προκύπτει ίσος με 6.8 από το γράφημα του Σχήματος 5.17 και

λύνοντας την εξίσωση 5.1 ως προς Δt προκύπτει ότι η άνοδος της στάθμης κατά 1.5m θα χρειαστεί 351sec, δηλαδή πρακτικώς 6min (360sec).

Δεδομένου ότι το ωφέλιμο εμβαδόν διατομής της γεώτρησης (εμβαδόν διατομής εσωτερικού σωλήνα και πορώδες φίλτρου) είναι $0.13m^2$, ο όγκος του νερού που θα βγάζει η αντλία σε διάστημα μιας ημέρας ανέρχεται σε

$$Q_{ini} = \frac{1.5m * 0.13 m^2}{360 sec} * (3600 sec * 24) = 47m^3$$

Η παραπάνω τιμή αφορά την αρχική περίοδο της λειτουργίας του δικτύου αντλητικών γεωτρήσεων, με το D να είναι πρακτικά 11m. Προς το τέλος της διαδικασίας ταπείνωσης του φρεάτιου ορίζοντα κατά 9m μετά από χρόνια, το D θα είναι 2m. Επαναλαμβάνοντας τους υπολογισμούς για $D=2m$, το S μειώνεται σε 2.15 και ο χρόνος αναπλήρωσης των 1.5m ύψους νερού στη γεώτρηση αυξάνεται στα 6250sec (δηλ. περίπου 1ώρα και 45λεπτά). Ως αποτέλεσμα, ο όγκος που θα αποδίδει κάθε γεώτρηση στη διάρκεια μιας ημέρας πέφτει στα $Q_{fin}=2.7m^3$. Οπότε, με βάση τα παραπάνω γίνεται η συντηρητική υπόθεση ότι κατά μέσο όρο σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας ταπείνωσης του φρεάτιου ορίζοντα, η κάθε γεώτρηση αποδίδει ημερησίως $20m^3$.

Θέτοντας ως στόχο το κατέβασμα του φρεάτιου ορίζοντα κατά 9m εντός 3-ετίας, ο όγκος του νερού που θα πρέπει να αντλείται σε ημερήσια βάση σε έκταση 550 στρεμμάτων (η οποία πέρα από τα 460 στρέμματα της παλαιοκατολίστης περιλαμβάνει και μια περιβάλλουσα ζώνη έτσι ώστε η υδραυλική κλίση και οι δυνάμεις διήθησης στα σύνορα της παλαιοκατολίστης να μην είναι υψηλές) είναι

$$\frac{550000m^2 * 9m}{3 * 365 days} = 4521 \frac{m^3}{days}$$

Σε αυτά θα πρέπει να προστεθούν τα $0.25 \times 550000 / 365 = 377m^3$ την ημέρα από τη συνεχιζόμενη οικιακή κατανάλωση και την κατείσδυση των νερών της βροχής. Συνεπώς, ο αριθμός των γεωτρήσεων που απαιτείται για την άντληση των $4898m^3$ νερού την ημέρα, με τον όγκο του νερού που κάθε αντλία θα μπορεί να τραβήξει σε διάστημα μιας ημέρας κατά μέσο όρο ίσο με $20m^3$, ανέρχεται σε

$$N_{γεωτ} = \frac{4898 \frac{m^3}{day}}{20 \frac{m^3}{day}} = 245$$

με τις αποστάσεις μεταξύ τους (spacing) σε έναν κατά προσέγγιση τετραγωνικό κάναβο να είναι

$$S = \sqrt{\frac{550000m^2}{245 \text{ γεωτρήσεις}}} = 47.4m$$

Σε αυτή την περίπτωση η ακτίνα επιρροής 36m είναι κατά 50% μεγαλύτερη από την μεσαπόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων (24m) και ως αποτέλεσμα θα υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Αυτή η αλληλοεπικάλυψη θα έχει ως συνέπεια η πραγματική απόδοση των γεωτρήσεων να είναι μικρότερη από ότι προβλέφθηκε παραπάνω, αφού η θεωρία στην οποία βασίζεται η Εξ. 5.1 θεωρεί μεμονωμένη γεώτρηση. Ο αντίκτυπος αυτού θα είναι να απαιτηθεί μεγαλύτερη χρονική διάρκεια αντλήσεων (π.χ. 4 έτη αντί για 3 έτη) για να επιτευχθεί η ταπείνωση κατά 9m.

5.3.2 Καθιζήσεις λόγω αντλήσεων

Η ταπείνωσή κατά 9m της στάθμης του φρεάτιου ορίζοντα προκαλεί μείωση της πίεσης πόρων Δu (ή αύξηση της αρνητικής πίεσης πόρων πάνω από τον φρεάτιο ορίζοντα) κατά 90kPa και άρα αύξηση της κατακόρυφου ενεργού τάσεως $\Delta \sigma'_v$ κατά 90kPa σε όλο το πάχος της μάργας που βρίσκεται κάτω από τον φρεάτιο ορίζοντα, αλλά και στη ζώνη τριχοειδούς ανύψωσης, όπου το έδαφος είναι πρακτικώς κορεσμένο. Η κατακόρυφη παραμόρφωση που προκαλείται από την αύξηση της σ'_v υπολογίζεται από την Εξ. (5.3). Διαιρώντας τη μάργα από τα 4m μέχρι τα 46m βάθος σε 21 υποστρώματα πάχους 2m και θεωρώντας $e_0=0.8$ και $C_s=0.05$ (Hobbs et al., 1986), η καθίζηση της ελεύθερης επιφάνειας υπολογίζεται ίση με 11.3cm (Πίνακας 5.3).

Η καθίζηση αυτή δεν είναι απαγορευτική για την υλοποίηση όσων προτείνει το 3^ο σενάριο σταθεροποίησης της κατολίσθησης, αλλά σίγουρα δεν μπορεί να αμεληθεί. Αν η καθίζηση αυτή προκαλείτο σε ένα κτίριο λόγω των φορτίων του, η πιθανότητα εμφάνισης ρωγμών στους τοίχους πληρώσεως θα ήταν πολύ μεγάλη, αφού τα 11.3cm υπερβαίνουν κατά πολύ το όριο των 5cm που θέτει Ευρωκώδικας 7. Όμως, σε αντίθεση με τις καθιζήσεις κτιρίων που οφείλονται στα φορτία τους, οι οποίες εντοπίζονται εντός της κάτοψής τους με μεγαλύτερες τιμές στο κέντρο του κτιρίου και μικρότερες στην περιμέτρό του (ενώ είναι αμελητέες στον περιβάλλοντα εξωτερικό χώρο), η καθίζηση λόγω των αντλήσεων θα

συμβεί παντού σε όλη την έκταση της κατολίσθησης. Οπότε σε αυτή την περίπτωση, το ποσοστό της ολικής καθίζησης που θα αποτελεί διαφορική καθίζηση (την άμεσο γενεσιουργό αιτία των βλαβών) θα είναι μικρότερο από ότι στην περίπτωση καθιζήσεων λόγω κτιριακών φορτίων.

Πίνακας 5.3. Υπολογισμός βράχυνσης υποστρωμάτων μάργας λόγω των αντλήσεων που προβλέπει το 3^ο σενάριο σταθεροποιητικών μέτρων.

Βάθος (m)	σ_{v0}' (kPa)	$\sigma_{v0}' + \Delta\sigma'_v$ (kPa)	$\Delta\varepsilon_z$	Δw (m)
5	125	215	0.007	0.0131
7	143	233	0.006	0.0118
9	161	251	0.005	0.0107
11	179	239	0.003	0.0070
13	197	257	0.003	0.0064
15	215	275	0.003	0.0059
17	233	293	0.003	0.0055
19	251	311	0.003	0.0052
21	269	329	0.002	0.0049
23	287	347	0.002	0.0046
25	305	365	0.002	0.0043
27	323	383	0.002	0.0041
29	341	401	0.002	0.0039
31	359	419	0.002	0.0037
33	377	437	0.002	0.0036
35	395	455	0.002	0.0034
37	413	473	0.002	0.0033
39	431	491	0.002	0.0031
41	449	509	0.002	0.0030
43	467	527	0.001	0.0029
45	485	545	0.001	0.0028
Σύνολο			w=	0.113m

Η καθίζηση 11.3cm λόγω καταβιβασμού του φρεάτιου ορίζοντα κατά 9m, η οποία θα συμβεί άπαξ, εξακολουθεί να είναι μικρότερη από την οριακή τιμή των 15cm πέρα από την οποία αρχίζουν να αναπτύσσονται βλάβες στον φέροντα οργανισμό των κτιρίων. Αντίθετα, η ίδια η κατολίσθηση μπορεί να παράξει τέτοιου μεγέθους (11.3cm) κατακόρυφες μετατοπίσεις κατά απόλυτο τιμή κάθε 4 έτη, αφού οι Hearn et al. (2018)

μέτρησαν ρυθμούς ανάπτυξης κατακόρυφων μετατοπίσεων λόγω της κατολίθησης 3 cm ανά έτος σε εκτεταμένες περιοχές στη ζώνη απομείωσης και στη ζώνη συσσώρευσης.

5.4 Κοστολόγηση μέτρων σταθεροποίησης

Στην ενότητα αυτή γίνεται εκτίμηση του κόστους των τριών εναλλακτικών σεναρίων σταθεροποιητικών μέτρων. Ανάλογα με την περίπτωση, το κόστος αφορά στην κατασκευή των επιχωμάτων (αντίβαρων), στην εγκατάσταση και λειτουργία των γεωτρήσεων άντλησης αλλά και στις απαλλοτριώσεις των εκτάσεων που θα πρέπει να δεσμευθούν.

5.4.1 Κόστος τεχνικών έργων

Σενάριο 1: Σταθεροποίηση αποκλειστικά με τοποθέτηση επιχώματος

Από την ογκομέτρηση του επιχώματος, που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα του κεφαλαίου, ο όγκος των υλικών που απαιτούνται για την δημιουργία του επιχώματος που σχεδιάστηκε ανέρχεται σε 2724008m³. Ως υλικό κατασκευής του επιχώματος προτείνεται λιθορριπή και εναλλακτικά αμμοχάλικο. Μεταξύ των δύο υλικών προτιμάται η λιθορριπή καθώς είναι σημαντικό το επίχωμα να στραγγίζει όσο το δυνατόν ευκολότερα. Έπειτα από έρευνα στο διαδίκτυο που εστιάστηκε σε έργα που περιελάμβαναν την κατασκευή επιχωμάτων, επιλέχθηκε τιμή μονάδος 9€/m³ για τη λιθορριπή και 8€/m³ για το αμμοχάλικο. Οι τιμές μονάδος συμπεριλαμβάνουν το κόστος αγοράς και μεταφοράς του υλικού στην περιοχή των εργασιών, καθώς και το κόστος τοποθέτησης και συμπύκνωσης. Συνεπώς, το κόστος για τη δημιουργία του επιχώματος με λιθορριπή εκτιμάται στα 24516072€ και με αμμοχάλικο στα 21792064€. Τα κυριότερα στοιχεία για την κατασκευή του σταθεροποιητικού επιχώματος συγκεντρώνονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4. Κόστος κατασκευής του επιχώματος του 1^{ου} σεναρίου σταθεροποιητικών μέτρων.

Κόστος κατασκευής επιχώματος 1 ^{ου} σεναρίου		
Όγκος επιχώματος : 2724008 m ³		
Υλικό κατασκευής	Τιμή μονάδος (€/m ³)	Κόστος κατασκευής επιχώματος (€)
Λιθορριπή	9	24516072
Αμμοχάλικο	8	21792064

Σενάριο 2: Σταθεροποίηση με συνδυασμό επιχώματος και ταπείνωσης του φρεάτιου ορίζοντα κατά 4m

Το 2^ο σενάριο σταθεροποιητικών μέτρων προβλέπει επίχωμα με όγκο που υπολογίστηκε στα 746714m³ και τα υλικά που προτείνονται για την κατασκευή του είναι είτε λιθορριπή είτε αμμοχάλικο. Όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση του επιχώματος του 1^{ου} σεναρίου, η τιμή μονάδος λιθορριπής είναι 9€/m³ και του αμμοχάλικου 8€/m³. Με βάση αυτά τα δεδομένα, το κόστος για την δημιουργία επιχώματος από λιθορριπή εκτιμάται στα 6720426€ και από αμμοχάλικο στα 5973712€ (Πίνακας 5.5).

Πίνακας 5.5. Κόστος κατασκευής του επιχώματος του 2^{ου} σεναρίου σταθεροποιητικών μέτρων.

Κόστος κατασκευής επιχώματος 2^{ου} σεναρίου		
Όγκος επιχώματος : 746714 m³		
Υλικό κατασκευής	Τιμή μονάδος (€/m³)	Κόστος κατασκευής επιχώματος (€)
Λιθορριπή	9	6720426
Αμμοχάλικο	8	5973712

Το 2^ο σενάριο σταθεροποιητικών μέτρων προβλέπει επίσης την κατασκευή και λειτουργία ενός δικτύου αντλητικών γεωτρήσεων με σκοπό την ταπείνωση του φρεάτιου υδροφόρου ορίζοντα κατά 4m σε 3 χρόνια. Στο συνολικό κόστος για την κατασκευή μιας γεώτρησης περιλαμβάνεται η ανόρυξη της γεώτρησης (μαζί με τις όποιες διευρύνσεις απαιτηθούν ώστε να αποκτήσει η γεώτρηση την επιθυμητή διάμετρο σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί αρχικά μικρότερο κοπτικό), ο περιφραγματικός σωλήνας, ο εσωτερικός διάτρητος σωλήνας (φίλτροσωλήνας), το χαλίκι, το κόστος αγοράς και εγκατάστασης της αντλίας μαζί με τον απαιτούμενο ηλεκτρικό εξοπλισμό και παρελκόμενα.

Έπειτα από έρευνα στο διαδίκτυο σχετικά με έργα στα οποία προβλέπονταν η κατασκευή γεωτρήσεων άντλησης καταγράφηκαν οι τιμές μονάδος για τις εργασίες, τα υλικά και τα κυριότερα μέρη που αποτελούν μια γεώτρηση (Πίνακας 5.6).

Πίνακας 5.6. Επιμέρους κόστη για την δημιουργία γεώτρησης βάθους 17m για άντληση υδάτων.

Κόστος κατασκευής αντλητικής γεώτρησης			
	Τιμή μονάδος	Ποσότητα	Κόστος (€)
Περιφραγματικός σωλήνας	70 €/m	3 m	210
Διάτρηση (56cm)	170 €/m	17 m	2890
Φίλτροσωλήνας (20cm)	60 €/m	16 m	960
Χαλίκι	47 €/m ³	1.72 m ³	81
Αντλία	-	-	8000
Σύνολο			12141

Το συνολικό κόστος μιας γεώτρησης, χωρίς να συνυπολογίζεται σε αυτό το κόστος λειτουργίας της αντλίας, προκύπτει στα 12141€. Στο 2^ο σενάριο σταθεροποίησης της κατολίθησης απαιτείται η κατασκευή 133 γεωτρήσεων, και συνεπώς το κόστος για την κατασκευή του συνόλου των γεωτρήσεων θα είναι 1614753€.

Με δεδομένο ότι οι γεωτρήσεις του 2^{ου} σεναρίου θα παράγουν ημερήσια κατά μέσο όρο 18m³ ενώ οι αντλίες έχουν ικανότητα άντλησης 20m³/hour (480m³/day), ο χρόνος που απαιτείται κάθε αντλία να λειτουργήσει κατά την διάρκεια της ημέρας είναι 0.9 ώρες (54min). Το κόστος ανά ώρα λειτουργίας ανέρχεται στα 4.5€ και κατά συνέπεια το κόστος λειτουργίας μιας αντλίας ανά ημέρα υπολογίζεται στα 4€. Στο σύνολο των 133 γεωτρήσεων, το κόστος λειτουργίας για 3 χρόνια θα είναι

$$133 \text{ γεωτρήσεις} * 4 \frac{\text{€}}{\text{day}} * 365 \text{ days} * 3 \text{ years} = 582540\text{€}$$

Ένα μέρος του αντλητικού δικτύου θα πρέπει να συνεχίσει να λειτουργεί και μετά την επίτευξη του επιδιωκόμενου καταβιβασμού της στάθμης του νερού μέχρι να υπάρξει ικανοποιητική επιβράδυνση της κατολίθησης ώστε να καταστεί δυνατή η κατασκευή κεντρικού αποχετευτικού δικτύου και συστήματος διαχείρισης όμβριων. Θεωρώντας ότι η περίοδος επιβράδυνσης της κατολίθησης θα έχει διάρκεια 3 ετών και τα υδραυλικά έργα θα κατασκευαστούν σε 2 χρόνια, η περίοδος που θα πρέπει να συνεχιστούν οι αντλήσεις είναι 5 έτη. Σε αυτά τα 5 έτη, θα πρέπει να απομακρύνονται 377m³ ημερησίως, ρυθμός που είναι 16% αυτού της περιόδου καταβιβασμού της στάθμης του υδροφόρου. Συνεπώς, το κόστος λειτουργίας των αντλιών σε αυτή τη φάση θα είναι

$$0.16 * 133 \text{ γεωτρήσεις} * 4 \frac{\text{€}}{\text{day}} * 365 \text{ days} * 5 \text{ years} = 155344\text{€}$$

Τα αντλούμενα νερά θα πρέπει να απομακρύνονται προς τα κατάντη μέσω ενός επιφανειακού δικτύου σωληνώσεων. Αρχικά τα νερά από κάθε σειρά του καννάβου αντλητικών γεωτρήσεων θα κινούνται προς ρέμα που αποτελεί το νότιο όριο της κατολίσθησης και μετά με αγωγό θα φτάνει 2km μακριά από την ακτή όπου θα γίνεται εκροή στο θαλάσσιο πυθμένα. Το συνολικό μήκος σωληνώσεων εκτιμάται σε περίπου 5km. Με μεικτή τιμή μονάδος 100€/m, το κόστος κατασκευής του δικτύου απομάκρυνσης των αντλούμενων νερών εκτιμάται προσεγγιστικά σε 500000€.

Επομένως, το συνολικό κόστος κατασκευής και λειτουργίας του συστήματος άντλησης και απομάκρυνσης των υπογείων υδάτων υπολογίζεται ότι ανέρχεται στα 2852637€.

Σενάριο 3 – Σταθεροποίηση αποκλειστικά με ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα

Το 3^ο σενάριο σταθεροποίησης περιλαμβάνει την κατασκευή 245 γεωτρήσεων άντλησης με σκοπό την ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα κατά 9 μέτρα σε 3 χρόνια. Το συνολικό κόστος μιας αντλητικής γεώτρησης βάθους 20m, χωρίς να προσμετράται σε αυτό το κόστος λειτουργίας της αντλίας, υπολογίζεται σε 12845€ (Πίνακας 5.7).

Πίνακας 5.7. Επιμέρους κόστη για την δημιουργία γεώτρησης βάθους 20m για άντληση υδάτων.

Κόστος κατασκευής αντλητικής γεώτρησης			
	Τιμή μονάδος	Ποσότητα	Κόστος (€)
Περιφραγματικός σωλήνας	70 €/m	3 m	210
Διάτρηση (56cm)	170 €/m	20 m	3400
Φιλτροσωλήνας (20cm)	60 €/m	19 m	1140
Χαλίκι	47 €/m ³	2.02 m ³	95
Αντλία	-	-	8000
Σύνολο			12845

Οπότε, το συνολικό κόστος για την κατασκευή του δικτύου 245 αντλητικών γεωτρήσεων ανέρχεται σε 3147025€.

Με δεδομένο ότι οι γεωτρήσεις του 3^{ου} σεναρίου θα παράγουν ημερήσια κατά μέσο όρο 20m³, ενώ οι αντλίες έχουν ικανότητα άντλησης 20m³/hour (480m³/day), ο χρόνος που

απαιτείται κάθε αντλία να λειτουργήσει κατά την διάρκεια της ημέρας είναι 1 ώρα (60min). Το κόστος ανά ώρα λειτουργίας ανέρχεται στα 4.5€ και κατά συνέπεια το κόστος λειτουργίας μιας αντλίας ανά ημέρα θα είναι 4.5€. Στο σύνολο των 245 γεωτρήσεων, το κόστος λειτουργίας για 3 χρόνια θα είναι

$$245 \text{ γεωτρήσεις} * 4.5 \frac{\text{€}}{\text{day}} * 365 \text{ days} * 3 \text{ years} = 1207238\text{€}$$

Ένα μέρος του αντλητικού δικτύου θα πρέπει να συνεχίσει να λειτουργεί και μετά την επίτευξη του επιδιωκόμενου καταβιβασμού της στάθμης του νερού μέχρι να υπάρξει ικανοποιητική επιβράδυνση της κατολίσθησης ώστε να καταστεί δυνατή η κατασκευή κεντρικού αποχετευτικού δικτύου και συστήματος διαχείρισης όμβριων. Θεωρώντας ότι η περίοδος επιβράδυνσης της κατολίσθησης θα είναι διάρκειας 3 ετών και τα υδραυλικά έργα θα κατασκευαστούν σε 2 χρόνια, η περίοδος που θα πρέπει να συνεχιστούν οι αντλήσεις είναι 5 έτη. Σε αυτά τα 5 έτη, θα πρέπει να απομακρύνονται 377m³ ημερησίως, ρυθμός που είναι 7.7% αυτού της περιόδου καταβιβασμού της στάθμης του υδροφόρου. Συνεπώς, το κόστος λειτουργίας των αντλιών σε αυτή τη φάση θα είναι

$$0.077 * 245 \text{ γεωτρήσεις} * 4.5 \frac{\text{€}}{\text{day}} * 365 \text{ days} * 5 \text{ years} = 154929\text{€}$$

Τα αντλούμενα νερά θα πρέπει να απομακρύνονται προς τα κατάντη μέσω ενός επιφανειακού δικτύου σωληνώσεων. Αρχικά τα νερά από κάθε σειρά του καννάβου αντλητικών γεωτρήσεων θα κινούνται προς ρέμα που αποτελεί το νότιο όριο της κατολίσθησης και μετά με αγωγό θα φτάνει στα 2km μακριά από την ακτή όπου θα γίνεται εκροή στον θαλάσσιο πυθμένα. Το συνολικό μήκος σωληνώσεων εκτιμάται σε περίπου 5km. Με μεικτή τιμή μονάδος 100€/m, το κόστος κατασκευής του δικτύου απομάκρυνσης των αντλούμενων νερών εκτιμάται προσεγγιστικά σε 500000€.

Επομένως, το συνολικό κόστος κατασκευής και λειτουργίας του συστήματος άντλησης και απομάκρυνσης των υπογείων υδάτων υπολογίζεται ότι ανέρχεται στα 5009192€.

5.4.2 Κόστος απαλλοτριώσεων

Κόστος απαλλοτριώσεων 1^{οο} σεναρίου σταθεροποίησης

Η δημιουργία ενός μεγάλου επιχώματος για τη σταθεροποίηση της κατολίσθησης συνεπάγεται την απαλλοτρίωση όλων των τεμαχίων και των κτιρίων που περιλαμβάνονται στην έκταση που αναμένεται να καλύπτει. Ειδικότερα, κρίνεται απαραίτητη η

απαλλοτρίωση 31 τεμαχίων και 1 κτιρίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται απαλλοτρίωση της συνολικής έκτασης των τεμαχίων, ενώ σε κάποιες άλλες γίνεται απαλλοτρίωση ενός μικρότερου τμήματος της έκτασης τους.

Πίνακας 5.8. Εκτιμώμενη αξία περιουσιών που θα χρειαστεί να απαλλοτριωθούν στο πλαίσιο του 1^{ου} σεναρίου μέτρων σταθεροποίησης.

Αριθμός τεμαχίου	Συνολικό εμβαδόν τεμαχίου (m ²)	Ποσοστό συνολικού εμβαδού προς απαλλοτρίωση (%)	Συνολική αξία τεμαχίου (€)	Αξία τμήματος τεμαχίου προς απαλλοτρίωση (€)
144	7024	50.8	252900	128473
148	7024	26.3	351200	92366
313	2007	100	80300	80300
314	15051	13.3	406400	54051
432	11372	22.6	337000	76162
433	2676	33.4	6000	2004
437	3011	100	31300	31300
438	3011	99.6	6800	6773
442	2676	100	4800	4800
443	4683	100	187300	187300
444	4348	100	173900	173900
448	14047	100	561900	561900
449	8362	100	389500	389500
452	15720	100	509300	509300
453	8362	83.4	334500	278973
454	8696	95.3	19600	18679
454	8696	95.2	19600	18659
455	11037	8.2	24800	2034
466	20068	13.6	40600	5522
609	11075	57.8	398700	230449
617	5352	5.3	12800	678
711	7358	55.2	16600	9163
712	335	100	800	800
713	14047	72.5	31600	22910
714	5649	100	203400	203400
823	10777	49.4	388000	191672
824	9153	36	329500	118620
838	14905	0.8478	578300	126
842	7934	99.8	387200	386426
1009	32628	64	998400	638976
1110	8646	0.664	311300	206703
			Σύνολο	4631918

Πίνακας 5.9. Συνολικό κόστος απαλλοτριώσεων στα πλαίσια του 1^{ου} σεναρίου μέτρων σταθεροποίησης.

Κόστος απαλλοτριώσεων 1 ^{ου} σεναρίου		
Συνολικό κόστος απαλλοτριώσεων τεμαχίων (€)	Συνολικό κόστος απαλλοτριώσεων κατοικιών (€)	Συνολικό κόστος απαλλοτριώσεων (€)
4631918	500000	5131918

Πίνακας 5.10. Εκτιμώμενη αξία περιουσιών που θα χρειαστεί να απαλλοτριωθούν στο πλαίσιο του 2^{ου} σεναρίου μέτρων σταθεροποίησης.

Αριθμός τεμαχίου	Συνολικό εμβαδόν τεμαχίου (m ²)	Ποσοστό συνολικού εμβαδού προς απαλλοτρίωση (%)	Συνολική αξία τεμαχίου (€)	Αξία τμήματος τεμαχίου προς απαλλοτρίωση (€)
313	6504	50.2	80300	40311
314	15051	2.5	406400	10160
432	11372	11.2	337000	37744
433	2676	5.8	6000	348
437	3011	100	31300	31300
438	3011	72.4	6800	4923
442	2676	100	4800	4800
443	4683	100	187300	187300
444	4348	100	173900	173900
448	14047	39.4	561900	221389
449	8362	100	389500	389500
452	15720	100	509300	509300
453	8362	83.3	334500	278639
454	8696	96.7	19600	18953
455	11037	7.8	24800	1934
466	20068	8.9	40600	3613
609	11075	6	398700	23922
617	5352	18.3	12800	2342
711	7358	49.1	16600	8151
712	7358	100	16600	16600
713	14047	54.3	31600	17159
714	5649	37.2	203400	75665
823	10777	88.7	388000	344156
824	9153	13	329500	42835
842	7934	12.7	387200	49174
1009	32628	26.7	998400	266573
1110	8646	33.3	311300	103663
			Σύνολο	2864354

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του Τμήματος Κτηματολογίου και Χωρομετρίας του Υπουργείου Εσωτερικών, καταγράφηκε το συνολικό εμβαδόν και η ενδεικτική αξία των τεμαχίων που εκτιμάται ότι θα δεσμευθούν. Τα στοιχεία αυτά σε συνδυασμό με το ποσοστό της έκτασης του κάθε τεμαχίου που θα απαλλοτριωθεί και την αξία που του αναλογεί παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.8.

Το συνολικό κόστος από τις απαλλοτριώσεις τεμαχίων ανέρχεται σε 4631918€ και σε αυτό θα πρέπει να προστεθεί το κόστος απαλλοτρίωσης μιας κατοικίας που υπολογίζεται σε 500000€ ανεβάζοντας το συνολικό κόστος απαλλοτριώσεων του 1^{ου} σεναρίου σταθεροποίησης στα 5131918€. Το κόστος των απαλλοτριώσεων παρουσιάζεται συνοπτικά στον παρακάτω Πίνακα 5.9.

Κόστος απαλλοτριώσεων 2^{ου} σεναρίου σταθεροποίησης

Το 2^ο σενάριο σταθεροποίησης προβλέπει ένα σημαντικά μικρότερο σε έκταση επίχωμα συγκριτικά με αυτό που προβλέπεται στο 1^ο σενάριο. Συγκεκριμένα, θα χρειαστεί η απαλλοτρίωση ολόκληρων ή μέρους 27 τεμαχίων και 1 κτιρίου. Σύμφωνα με τα δεδομένα του Τμήματος Κτηματολογίου και Χωρομετρίας του Υπουργείου Εσωτερικών, τα στοιχεία κάθε τεμαχίου που θα πρέπει να απαλλοτριωθεί παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.10.

Το συνολικό κόστος απαλλοτριώσεων τεμαχίων ανέρχεται σε 2864354€ και σε αυτό θα πρέπει να προστεθεί το κόστος απαλλοτρίωσης μιας κατοικίας που υπολογίζεται σε 500000€, ανεβάζοντας το συνολικό κόστος απαλλοτριώσεων του 2^{ου} σεναρίου σταθεροποίησης στα 3364354€ (Πίνακας 5.11).

Πίνακας 5.11. Συνολικό κόστος απαλλοτριώσεων 2^{ου} σεναρίου σταθεροποίησης.

Κόστος απαλλοτριώσεων 2^{ου} σεναρίου		
Συνολικό κόστος απαλλοτριώσεων τεμαχίων (€)	Συνολικό κόστος απαλλοτριώσεων κατοικιών (€)	Συνολικό κόστος απαλλοτριώσεων (€)
2864354	500000	3364354

5.4.3 Συνολικό κόστος

Για το 1^ο σενάριο σταθεροποίησης εκτιμήθηκε ότι η κατασκευή του επιχώματος από λιθορριπή θα στοιχίσει 24516072€, ενώ αν κατασκευαστεί από αμμοχάλικο 21792064€. Το συνολικό κόστος των απαλλοτριώσεων ανέρχεται στα 5131918€. Επομένως, το

συνολικό κόστος του 1^{ου} σεναρίου, θα ανέλθει στα 29647990€ με υλικό κατασκευής την λιθορριπή και στα 26923982€ με υλικό κατασκευής το αμμοχάλικο (Πίνακα 5.12).

Πίνακας 5.12. Συνολικό κόστος υλοποίησης 1^{ου} σεναρίου.

Υλικό επιχώματος	Λιθορριπή	Αμμοχάλικο
Κόστος επιχώματος (€)	24516072	21792064
Κόστος απαλλοτριώσεων (€)	5131918	5131918
Συνολικό κόστος (€)	29647990	26923982

Για το 2^ο σενάριο υπολογίστηκε ότι το κόστος κατασκευής του επιχώματος με λιθορριπή θα φτάσει τα 6720426€, ενώ με αμμοχάλικο τα 5973712€. Το κόστος των απαλλοτριώσεων εκτιμήθηκε στα 3364354€ και το συνολικό κόστος κατασκευής και λειτουργίας του συστήματος άντλησης και απομάκρυνσης υπογείων υδάτων θα είναι 2852637€. Επομένως, το συνολικό κόστος του 2^{ου} σεναρίου, το οποίο παρουσιάζεται στον πίνακα 5.13, θα ανέλθει στα 12937417€ με υλικό κατασκευής του επιχώματος την λιθορριπή και τα 12190703€ με υλικό κατασκευής το αμμοχάλικο.

Πίνακας 5.13. Συνολικό κόστος υλοποίησης 2^{ου} σεναρίου.

Συνολικό κόστος 2^{ου} σεναρίου		
Κόστος επιχώματος		
Υλικό επιχώματος	Λιθορριπή	Αμμοχάλικο
Κόστος επιχώματος (€)	6720426	5973712
Κατασκευή και λειτουργία συστήματος άντλησης (€)	2352637	
Κόστος απαλλοτριώσεων (€)	3364354	
Κόστος απομάκρυνσης αντλούμενων υδάτων (€)	500000	
Συνολικό κόστος		
Συνολικό κόστος με επίχωμα λιθορριπής (€)	12937417	
Συνολικό κόστος με επίχωμα αμμοχάλικου (€)	12190703	

Το κόστος υλοποίησης του 3^{ου} σεναρίου, περιλαμβάνει μόνο το συνολικό κόστος κατασκευής και λειτουργίας του συστήματος άντλησης και απομάκρυνσης των υπογείων υδάτων, που εκτιμήθηκε στα 5009192€. Στο εν λόγω σενάριο δεν προβλέπονται απαλλοτριώσεις ιδιοκτησιών.

5.5 Εκτίμηση σεισμικών μετατοπίσεων

Η διαστασιολόγηση των σταθεροποιητικών μέτρων έγινε με γνώμονα την επίτευξη συντελεστή ασφαλείας ίσου με 1.25 υπό στατικές συνθήκες. Κατά συνέπεια, τίθεται το ερώτημα κατά πόσο αυτό εξασφαλίζει επαρκή επίδοση και υπό συνθήκες σεισμού. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 5, η σεισμική επάρκεια ενός πρανούς μπορεί να ελεγχθεί βάσει υπολογισμού της παραμένουσας μετατόπισης που ενδέχεται να αναπτυχθεί κατά τη διάρκεια ενός σεισμού χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του ολισθαίνοντος τεμάχους (sliding block method) (Newmark, 1965).

Με βάση μεγάλο αριθμό αναλύσεων ολισθαίνοντος τεμάχους, ο Jibson (2007) πρότεινε την παρακάτω προσεγγιστική σχέση για την εκτίμηση της παραμένουσας σεισμικής μετατόπισης ενός πρανούς συναρτήσει της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης PGA, του σεισμικού μεγέθους ροπής M και της κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης a_{crit} , η οποία είναι η τιμή της επιτάχυνσης που φέρνει το πρανές σε κατάσταση οριακής ισορροπίας:

$$\log d_{perm} = -2.71 + \log \left[\left(1 - \frac{a_{crit}}{PGA} \right)^{2.335} \left(\frac{a_{crit}}{PGA} \right)^{-1.478} \right] + 0.424M \quad (\text{Εξ. 5.5})$$

όπου d_{perm} η παραμένουσα μετατόπιση λόγω σεισμού σε cm. Λίγα χρόνια αργότερα, οι Rathje & Saygili (2009) πρότειναν την παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό της παραμένουσας μετατόπισης:

$$\ln d_{perm} = 4.89 - 4.85 \left(\frac{a_{crit}}{PGA} \right) - 19.64 \left(\frac{a_{crit}}{PGA} \right)^2 + 42.49 \left(\frac{a_{crit}}{PGA} \right)^3 - 29.06 \left(\frac{a_{crit}}{PGA} \right)^4 + 0.72 \ln(PGA) + 0.89(M - 6) \quad (\text{Εξ. 5.6})$$

όπου d_{perm} σε cm και PGA σε g.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.5, η σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού για έδαφος κατηγορίας A (δηλαδή σε επιφανειακή εμφάνιση βράχου) σύμφωνα με το Κυπριακό Εθνικό Προσάρτημα στον Ευρωκώδικα 8 είναι ίση με 0.25g. Η τιμή αυτή ισχύει για σεισμό σχεδιασμού με περίοδο επαναφοράς 475 χρόνια (πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 χρόνια). Δεδομένου ότι η μάργα είναι ουσιαστικά μια δύσκαμπτη υπερστερεοποιημένη άργιλος και εκτείνεται μέχρι τα 47m βάθος, η κατηγορία εδάφους της περιοχής είναι C και ο αντίστοιχος συντελεστής εδαφικής ενίσχυσης S λαμβάνεται ίσος με 1.15. Συνεπώς, η

μέγιστη επιτάχυνση σχεδιασμού (PGA) είναι $0.25 \times 1.15 = 0.2875g$. Σύμφωνα με τις μικροζωνικές μελέτες της Πάφου και της Λεμεσού, οι οποίες είναι οι πλησιέστερες στο Πισσούρι, το μέγεθος του σεισμού σχεδιασμού (περίοδος επαναφοράς 475 έτη) είναι $M=6.5$ και για τις δυο πόλεις (Πιτιλάκης et al., 2000, 2005). Αυτή η τιμή θα μπορούσε να υιοθετηθεί και για το Πισσούρι, το οποίο βρίσκεται μεταξύ των δυο αυτών αστικών κέντρων.

Η κρίσιμη σεισμική επιτάχυνση a_{crit} εξαρτάται από την αντοχή που αναπτύσσει το έδαφος κατά τη σύντομη χρονική διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος. Στην περίπτωση της μάργας, αυτή θα συμπεριφερθεί σε σεισμό υπό αστράγγιστες συνθήκες λόγω της μικρής διαπερατότητάς της, ως λεπτόκοκκο εδαφικό υλικό. Όντας μια υπερστερεοποιημένη άργιλος, η μάργα εκτός της επιφάνειας ολίσθησης θα αναπτύξει σημαντικά μεγαλύτερη διατμητική αντοχή υπό αστράγγιστες συνθήκες από ότι υπό στραγγιζόμενες (Lambe & Whitman, 1969). Σε ότι αφορά τη μάργα στην επιφάνεια ολίσθησης, οι Tika et al. (1996) διαπίστωσαν ότι για γρήγορους ρυθμούς ολίσθησης ($>1m/min$), όπως αυτούς που μπορούν να συμβούν κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, η παραμένουσα διατμητική αντοχή των εδαφών μπορεί να είναι μεγαλύτερη, ίση ή και μικρότερη (ανάλογα με τη σύστασή τους) από αυτή που ισχύει για τους αργούς ρυθμούς ολίσθησης ($<10^{-5}m/min$, ήτοι $<5.3m/yr$), δηλαδή όπως αυτούς με τους οποίους εξελίσσεται η εν λόγω κατολίσθηση. Εντούτοις, τα πειραματικά αποτελέσματα των Tika et al. (1996) δείχνουν ότι, για εδάφη μεγάλης πλαστικότητας με $PI > 30$ και $CF > 40\%$, όπως οι κρίσιμοι ορίζοντες μάργας στην εξεταζόμενη περιοχή, η παραμένουσα διατμητική αντοχή σε συνθήκες ταχείας ολίσθησης είναι σπανίως μικρότερη από αυτή για βραδεία ολίσθηση. Η γκρι μάργα στους ορίζοντες αδυναμίας που έχουν ταυτοποιηθεί στο εδαφικό προφίλ έχει $PI = 35 - 40$ και $CF = 40\% - 50\%$ (Σχήμα 3.36). Επιπλέον, με κάθε αλλαγή ρυθμού φόρτισης (από τις πολλές που συμβαίνουν κατά την διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος), θα εμφανίζεται στιγμιαία μια μέγιστη (κορυφαία) τιμή διατμητικής αντοχής που είναι 40% με 50% μεγαλύτερη από την παραμένουσα αντοχή (Tika et al., 1996).

Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω, οι αντοχές γενικά που θα κινητοποιήσει η μάργα κατά τη διάρκεια ενός σεισμού αναμένονται να είναι μεγαλύτερες από ότι υπό τις τρέχουσες (στατικές) συνθήκες. Χάριν απλότητας, για τον υπολογισμό της a_{crit} γίνεται εδώ η συντηρητική παραδοχή ότι η διατμητική αντοχή της μάργας υπό συνθήκες σεισμού θα είναι η ίδια με αυτή υπό στατικές συνθήκες. Αυτή η παραδοχή επιτρέπει να εκτιμηθεί

προσεγγιστικά η a_{crit} συναρτήσει του στατικού συντελεστή ασφαλείας FS χρησιμοποιώντας τη σχέση των Saygili & Rathje (2009), η οποία ισχύει για επίπεδη (μεταθετική) ολίσθηση πολύ μεγάλου μήκους:

$$a_{crit} = \frac{FS - 1}{\tan \phi + \frac{1}{\tan \delta}} \quad (\text{Εξ. 5.7})$$

όπου δ η κλίση της επίπεδης επιφάνειας ολίσθησης. Η παραπάνω σχέση δίνει πρακτικώς τα ίδια αποτελέσματα με την παλαιότερη σχέση ($a_{crit}=(FS-1)\sin\delta$) που προτάθηκε από τον Newmark (1965). Για $FS=1.25$ που εξασφαλίζουν υπό στατικές συνθήκες τα προτεινόμενα σταθεροποιητικά μέτρα, γωνία τριβής $\phi=\phi_R=10.5^\circ$ και δ ίσο με 5.3° , η a_{crit} προκύπτει από την εξίσωση (5.7) ίση με 0.0228g.

Για $a_{crit}=0.0228g$, $PGA=0.2875g$ και $M=6.5$, οι εξισώσεις (5.5) και (5.6) προβλέπουν d_{perm} ίση με 39cm και 52cm, αντίστοιχα. Άρα, η παραμένουσα σεισμική μετατόπιση για τον σεισμό σχεδιασμού αναμένεται να είναι το πολύ της τάξεως των 0.4m – 0.5m. Ένα τέτοιο μέγεθος μετατόπισης σίγουρα θα δημιουργήσει βλάβες στις υπάρχουσες οικοδομές. Εντούτοις, αποτελεί ένα μικρό κλάσμα (περίπου 10%) της συνολικής μετατόπισης που έχει αναπτυχθεί στο πρηνές από το 2010 μέχρι σήμερα και η οποία υπερβαίνει τα 5m σύμφωνα με τα δορυφορικά δεδομένα των Hearn et al. (2018, 2020). Επομένως, η παραμένουσα μετατόπιση που θα προξενήσει ο ενδεχόμενος σεισμός σχεδιασμού θα είναι αιτία να προκληθούν σαφώς λιγότερες ζημιές από αυτές που έχουν συμβεί μέχρι τώρα από την κατολίσθηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο καταγράφονται τα κυριότερα σημεία της παρούσας μελέτης και διατυπώνονται τα καταληκτικά συμπεράσματα βάσει των αποτελεσμάτων των αναλύσεων της κατολίσθησης στην περιοχή Λίμνες της κοινότητας Πισσουρίου. Επίσης γίνεται τελική αξιολόγηση των δυνητικών μέτρων σταθεροποίησης της κατολίσθησης.

Το εύρος στο οποίο είναι ρεαλιστικό να βρίσκεται η παραμένουσα αντοχή της μάργας Λευκωσίας καθορίστηκε με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία και μελέτες σχετικά με τα αργιλικά γεωϋλικά της Κύπρου. Για τον καθορισμό της γεωμετρίας της επιφάνειας ολίσθησης και της κρίσιμης στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα έγιναν αντίστροφες αναλύσεις ευστάθειας στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 2D.

6.1 Κατολισθητικό φαινόμενο

Με βάση το σύνολο των ενδείξεων από το πεδίο και των αποτελεσμάτων των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων, εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα για τα αίτια και τα χαρακτηριστικά του μηχανισμού του κατολισθητικού φαινομένου:

- 1) Το τρέχον κατολισθητικό φαινόμενο στην περιοχή Λίμνες της κοινότητας Πισσουρίου αποδίδεται στην πλήρη επανενεργοποίηση μίας παλαιοκατολίσθησης.
- 2) Η επιφάνεια ολίσθησης εκτιμάται ότι βρίσκεται εντός του στρώματος γκρίζας μάργας του γεωλογικού σχηματισμού Λευκωσίας με παραμένουσα γωνία τριβής εντός του εύρους 10° - 11° και σε βάθος περίπου 40m-47m από την επιφάνεια του εδάφους στο κύριο σώμα της κατολίσθησης, δηλαδή ελάχιστα πιο πάνω από το υποκείμενο στρώμα ασβεστορρουδίτη, το οποίο αποτελεί το βραχώδες υπόβαθρο της περιοχής μαζί με τον γύψο του γεωλογικού σχηματισμού Κανναβιού.
- 3) Η βάση της επιφάνειας ολίσθησης είναι εκτεταμένη και ακολουθεί τις επιφάνειες διαστρωμάτωσης, οι οποίες αποτελούν εγγενείς επιφάνειες αδυναμίας εντός του υπεδάφους, γεγονός που εξηγεί τη δημιουργία της παλαιοκατολίσθησης σε ένα εν γένει μικρής κλίσης ανάγλυφο. Από τη γεωμετρία της επιφάνειας ολίσθησης συνάγεται ότι ο τύπος της κατολίσθησης είναι μικτή μεταθετική/περιστροφική, με τον μεταθετικό χαρακτήρα να είναι ο κυριότερος.

- 4) Οι αντοχές των βραχομαζών γύψου και ασβεστορρουδίτη είναι πολύ μεγάλες για να επιτρέψουν στην επιφάνεια ολίσθησης να επεκτείνεται μέσα σε αυτές. Επιπλέον, η επιφάνεια ολίσθησης δεν μπορεί να βρίσκεται σε μικρότερα βάθη από 32m διότι αυτό θα απαιτούσε η παραμένουσα αντοχή της μάργας να είναι μικρότερη από τα αναμενόμενα όρια με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά της.
- 5) Ο πόδας της επιφάνειας ολίσθησης της τρέχουσας κατολίσθησης θα μπορούσε να εντοπίζεται σε περισσότερες από μια θέσεις, δηλαδή δυτικά αλλά και ανατολικά της απόληξης του ποδός της παλαιοκατολίσθησης, αφού τέτοιες επιφάνειες ολίσθησης έδωσαν αντίστροφα υπολογισθείσες τιμές παραμένουσας γωνίας τριβής (γωνία τριβής ώστε $FS=1$) εντός του εύρους τιμών 10° - 11° που είναι το πλέον πιθανό με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά της μάργας και τη βιβλιογραφία. Εντούτοις, ως πιθανότερη θέση κρίνεται ότι είναι η απόληξη του ποδός της παλαιοκατολίσθησης, όπως αυτή διαφαίνεται από τη γεωμορφολογία της περιοχής.
- 6) Ο σημαντικότερος παράγοντας που συντελεί στην αστάθεια της περιοχής (πέρα από την παρουσία της επιφάνειας αστοχίας της παλαιοκατολίσθησης με τις πολύ χαμηλές παραμένουσες αντοχές) είναι η παρουσία ενός υψηλού φρεάτιου (υδροφόρου) ορίζοντα, ο οποίος στις περιόδους έντονων βροχοπτώσεων και συνεπαγόμενων μετακινήσεων βρίσκεται σε βάθος μόλις 6m από την επιφάνεια του εδάφους. Η επανενεργοποίηση της παλαιοκατολίσθησης οφείλεται στη σταδιακή αύξηση με τα χρόνια της στάθμης του φρεάτιου ορίζοντα λόγω της τροφοδοσίας του με νερά από τους απορροφητικούς λάκκους των οικιστικών αναπτύξεων των τελευταίων δεκαετιών. Οι πρώτες μετακινήσεις οδήγησαν στην ανάπτυξη ρωγμών στην ζώνη απομείωσης της παλαιοκατολίσθησης, δίνοντας τη δυνατότητα σε νερά της βροχής να εισέρχονται σε μεγαλύτερο βαθμό εντός του υπεδάφους, επιταχύνοντας έτσι το φαινόμενο.

6.2 Απαιτούμενα σταθεροποιητικά μέτρα

Σε ότι αφορά τις δυνατότητες σταθεροποίησης της κατολίσθησης, εξετάστηκαν τρία σενάρια (δέσμες) μέτρων. Το πρώτο περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός επιχώματος μεγάλης έκτασης. Το δεύτερο αφορά στη συνδυαστική δράση ενός μικρού επιχώματος και ενός μεγάλου αριθμού γεωτρήσεων άντλησης με σκοπό την ταπείνωση του υδροφόρου

ορίζοντα κατά 4m. Το τρίτο σενάριο σταθεροποίησης στηρίζεται αποκλειστικά στην λειτουργία γεωτρήσεων άντλησης για την ταπείνωση του υδροφόρου κατά 9m. Ως απαιτούμενος συντελεστής ασφαλείας θεωρήθηκε η τιμή 1.25. Έπειτα από μελέτη των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με μέτρα για τη σταθεροποίηση της κατολίσθησης και τον υπολογισμό του αντίστοιχου κόστους, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- i) Το κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος και των τριών δεσμών μέτρων ανέρχεται σε πολλά εκατομμύρια ευρώ. Το κόστος της πρώτης δέσμης, δηλαδή της κατασκευής ενός μεγάλου σταθεροποιητικού επιχώματος-αντίβαρου, εκτιμήθηκε μεταξύ 27 και 30 εκατομμυρίων ευρώ, με το τελικό ποσό να καθορίζεται από τον τύπο των υλικών επιχώματωσης που θα επιλεγεί. Η δεύτερη δέσμη, η οποία προβλέπει μικρότερο επίχωμα σε συνδυασμό με αντλήσεις για ταπείνωση του φρεάτιου ορίζοντα, είναι περισσότερο συμφέρουσα οικονομικά σε σύγκριση με την πρώτη, καθώς το κόστος της κυμαίνεται περί τα 12 με 13 εκατομμύρια ευρώ. Τέλος η τρίτη δέσμη, η οποία βασίζεται αποκλειστικά σε αντλήσεις με συνολικό κόστος 5 εκατομμύρια ευρώ, αποτελεί μακράν την πιο ελκυστική πρόταση βάσει αποκλειστικά οικονομικών κριτηρίων.
- ii) Η επιλογή και κατ' επέκταση η κατασκευή όσων προβλέπει η κάθε μια από τις δέσμες μέτρων ενέχει ρίσκο, το οποίο ανά περίπτωση διαφοροποιείται. Η δεύτερη και η τρίτη δέσμη μέτρων που περιλαμβάνουν την κατασκευή γεωτρήσεων άντλησης εκτιμάται ότι εισάγουν στο έργο μεγαλύτερες επισφάλειες καθώς: α) υπάρχει κίνδυνος κάποιες από τις αντλητικές γεωτρήσεις, οι οποίες θα πρέπει να φθάνουν σε σχετικά μεγάλο βάθος για να είναι αποδοτικές, να σπάσουν λόγω των μετακινήσεων της ολισθαίνουσας μάζας με αποτέλεσμα η λειτουργία τους να διακοπεί, β) η ταπείνωση του φρεάτιου υδροφόρου ορίζοντα θα οδηγήσει στην ανάπτυξη καθιζήσεων (της τάξεως 7cm-11cm), των οποίων η κατανομή και συνεπώς το μέγεθος των συνεπαγόμενων διαφορικών καθιζήσεων που θα υποστούν οι υφιστάμενες κατασκευές είναι δύσκολο να εκτιμηθεί με ικανοποιητικό βαθμό βεβαιότητας, γ) υπάρχουν σημαντικές αβεβαιότητες σχετικά με τη διαπερατότητα του στρώματος της μάργας και του καθεστώτος ροής που θα δημιουργηθεί μακροπρόθεσμα εντός αυτής λόγω των αντλήσεων. Σε ότι αφορά το τελευταίο σημείο, πρέπει να επισημανθεί ότι αν ο συντελεστής υδραυλικής διαπερατότητας της μάργας μειώνεται σημαντικά κατά τη διάρκεια των αντλήσεων και μεσοσταθμικά είναι, για παράδειγμα, δέκα φορές μικρότερος από

ότι θεωρήθηκε στους υπολογισμούς του Κεφαλαίου 5, τότε το κόστος κατασκευής των γεωτρήσεων πρακτικά δεκαπλασιάζεται. Δηλαδή, στην περίπτωση του 2^{ου} σεναρίου σταθεροποιητικών μέτρων το συνολικό κόστος θα ανέλθει στα 27 εκατομμύρια ευρώ (με αποτέλεσμα το κόστος να είναι συγκρίσιμο με αυτό του 1^{ου} σεναρίου) και του 3^{ου} σεναρίου θα ανέλθει σε 33 εκατομμύρια ευρώ (κόστος μεγαλύτερο από ότι του 1^{ου} σεναρίου). Πέραν τούτου, η πυκνότητα του δικτύου γεωτρήσεων γίνεται τόσο μεγάλη που ενδέχεται να είναι ανέφικτο να χωροθετηθούν. Αυτό καταδεικνύει ότι για τη σχεδίαση μιας λύσης σταθεροποίησης που θα περιλαμβάνει καταβιβασμό του φρεάτιου ορίζοντα είναι απολύτως απαραίτητη η διενέργεια δοκιμαστικών αντλήσεων μακράς διάρκειας ώστε να εκτιμηθεί εκ των προτέρων και με όσο το δυνατόν περισσότερη αξιοπιστία ο συντελεστής διαπερατότητας στις συνθήκες που προβλέπει η εκάστοτε λύση σταθεροποίησης.

- iii) Όσον αφορά τα επιχώματα, το ρίσκο είναι μικρότερο χάρη στην υφιστάμενη τεχνογνωσία για την κατασκευή τους και στην εμπειρία σχετικά με την αποδοτικότητά τους, αφού έχουν εφαρμοστεί σε σημαντικό αριθμό τεχνικών έργων σταθεροποίησης αργιλικών πρανών στην Κύπρο. Το ρίσκο που ενέχει μια λύση που βασίζεται πλήρως ή εν μέρει στην κατασκευή σταθεροποιητικού επιχώματος έχει να κάνει κυρίως με τις παραδοχές που έχουν γίνει σχετικά με τη θέση του κατάντη άκρου της επιφάνειας ολίσθησης. Σε περίπτωση που αυτό βρίσκεται στην πραγματικότητα πιο ανάντη από ότι έχει υποτεθεί στους υπολογισμούς, το επίχωμα ενδέχεται να έχει μικρότερη έως και καθόλου συνεισφορά στην σταθεροποίηση της κατολίσθησης. Αντίθετα, ο καταβιβασμός του φρεάτιου ορίζοντα συνεισφέρει πάντα στην αύξηση της ευστάθειας, ανεξάρτητα από την πραγματική γεωμετρία της επιφάνειας ολίσθησης.
- iv) Η δημιουργία επιχώματος από λιθορριπή είναι μια λύση υψηλότερου κόστους, σε σύγκριση με επίχωμα από αμμοχάλικο. Εντούτοις, η λιθορριπή είναι προτιμότερη διότι στραγγίζει ευκολότερα, κάτι το οποίο είναι κρίσιμο για το υπό εξέταση πρόβλημα.
- v) Η κατασκευή του μεγάλου επιχώματος της πρώτης προτεινόμενης λύσης πρόκειται να δεσμεύσει μια μεγάλη έκταση γης (160 στρέμματα), απαιτώντας έτσι την απαλλοτρίωση πολλών τεμαχίων. Αντίθετα, η τρίτη δέσμη μέτρων δεν

προβλέπει την απαλλοτρίωση ιδιοκτησιών και σε περίπτωση επιτυχίας της σταθεροποίησης όλη η έκταση της περιοχής θα μπορεί να αξιοποιηθεί οικιστικά.

6.3 Καταληκτικά σχόλια

Τα όποια σταθεροποιητικά μέτρα θα πρέπει να κατασκευαστούν το συντομότερο δυνατόν διότι η συνέχιση των μετατοπίσεων αφαιρεί στήριξη από την κύρια κατακρήμιση, γεγονός που μοιραία θα οδηγήσει στην επέκταση των κατολισθητικών φαινομένων στην ανάντη οικιστική περιοχή που είναι εκτός παλαιοκατολίσθησης. Η εκκένωση απλά της περιοχής της παλαιοκατολίσθησης χωρίς την κατασκευή οποιουδήποτε σταθεροποιητικού έργου δεν αποτελεί δόκιμη λύση διότι, πέρα από το σχετικά μεγάλο κόστος των αποζημιώσεων, η κατολίσθηση θα εξακολουθεί να κινείται ακόμη και με την παύση της αστικής χρήσης της γης και των εκροών αστικών λυμάτων. Αυτό οφείλεται στο ότι η ολισθαίνουσα μάζα έχει διαταραχθεί ήδη σε μεγάλο βαθμό και έχει αναπτυχθεί ένα εκτενές δίκτυο κατακόρυφων ρωγμών μεγάλου εύρους που οδηγεί τα όμβρια ύδατα εντός του υπεδάφους, ανυψώνοντας με ευκολία τη στάθμη του φρεάτιου ορίζοντα κατά τις περιόδους βροχοπτώσεων. Συνεπώς, και σε αυτή την περίπτωση θα τεθούν σε κίνδυνο οι κατοικίες των περιοχών ανάντη της κυρίας κατακρήμισης της παλαιοκατολίσθησης.

Εν κατακλείδι, η παρούσα εργασία καταδεικνύει ότι η πρόληψη είναι μακράν προτιμότερη της εκ των υστέρων επέμβασης. Η εν λόγω οικιστική ανάπτυξη βρίσκεται εντός μιας προφανέστατης παλαιοκατολίσθησης και μια γεωλογική/γεωτεχνική μελέτη της περιοχής θα μπορούσε να προβλέψει το δυνητικό πρόβλημα αστάθειας. Η περιοχή Λίμνες της Κοινότητας Πισσουρίου δεν έπρεπε να δοθεί για ανάπτυξη χωρίς την εξ' αρχής κατασκευή κεντρικού αποχετευτικού συστήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής βιβλιογραφία

- Alexandris, A., Katsipi Griva, I. and Abarioti, M. (2017). Remediation of The Pissouri Landslide in Cyprus, *International Journal of Geoengineering Case Histories*, 4, pp. 14-28. [online] Διαθέσιμο από : https://www.geocasehistoriesjournal.org/pub/article/view/IJGCH_4_1_2 [3 Φεβρουαρίου 2020]
- Algermissen, T. and Rogers, A. (2004). Chapter 5 - A Cyprus Earthquake Hazard Assessment: Maps of Probabilistic Peak Ground Acceleration and Uniform - Hazard Pseudo -Absolute Acceleration Spectral Response. in *Seismic Hazard and Risk Assessment of the Greater Nicosia Area*, eds. DeCoster M., Zomeni Z., Panayides I., Petrides G., Berksoy O., USAID-UNDP Project.
- Barnes, G. (2016). *Soil mechanics: principles and practice*. Macmillan International Higher Education.
- ISRM (1981). *Rock characterization, testing and monitoring. ISRM suggested methods*. Ed. E. T. Brown, Pergamon Press.
- Cedergren, H. R. (1997). *Seepage, drainage, and flow nets*. John Wiley & Sons.
- Charalambous M., Hobbs P.R.N., Northmore K.J. (1986). Supplementary geotechnical and mineralogical data for cohesive soil samples from selected sites across Cyprus. *Engineering geology of cohesive soils associated with ophiolites, with particular reference to Cyprus*, British Geological Survey, Report EGARP-KW/86/5.
- Coates, D. (1977). *Landslides: Reviews in Engineering Geology, Volume III*. Colorado: The Geological Society of America. Διαθέσιμο από: [https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=-Dr5YqsAeNIC&oi=fnd&pg=PA3&dq=Coates+\(1977\)&ots=C0ccfEEua1&sig=s0WkjvH71tv6KzpSx0IHdm-Ke4E&redir_esc=y#v=onepage&q=Coates%20\(1977\)&f=false](https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=-Dr5YqsAeNIC&oi=fnd&pg=PA3&dq=Coates+(1977)&ots=C0ccfEEua1&sig=s0WkjvH71tv6KzpSx0IHdm-Ke4E&redir_esc=y#v=onepage&q=Coates%20(1977)&f=false) [9 Δεκεμβρίου 2021]
- Cruden, D.M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43(1), 27-29. [online] Διαθέσιμο από: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02590167> [26 Μαρτίου 2021]
- Cruden, D.M. & Varnes, D.J. (1996). *Landslide Types and Processes*, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, 247, 36-75. [online] Διαθέσιμο από: https://www.researchgate.net/publication/269710331_CrudenDMVarnes_DJ1996_Landslide_Types_and_Processes_Transportation_Research_Board_US_National_Academy_of_Sciences_Special_Report_247_36-75 [22 Μαρτίου 2021]
- Erskine C. (1973). *Landslides in the Vicinity of the Fort Randall Reservoir, South Dakota*, United States Geological Survey Professional Paper 675. US Govt. Print. Off., Washington D.C.

- Hearn, G.,J., Larkin, H., Hadjicharalambous, K., Papageorgiou, A., Elina Zoi, G. (2018). Proving a landslide: ground behaviour problems at Pissouri, Cyprus. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 51(4), 461-482.
- Hobbs P.R.N., Loucaides G., Petridis G. (1986). Geotechnical properties and behaviour of Pliocene marl in Nicosia, Cyprus. Engineering geology of cohesive soils associated with ophiolites, with particular reference to Cyprus, British Geological Survey, Report. EGARP-KW/86/1.
- IAEG Commission on Landslides (1990). Suggested nomenclature for landslides. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 41, 13-16. [online] Διαθέσιμο από : <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02590202> [21 Μαρτίου 2021]
- Google Maps (2021). Δεδομένα χάρτη. [online] Διαθέσιμο από : <https://www.google.com/maps/place/%CE%9A%CF%8D%CF%80%CF%81%CE%BF%CF%82/@35.1675094,32.8647502,9z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x14de1767ca494d55:0x324c3c807fc4146e!8m2!3d35.126413!4d33.429859> [5 Απριλίου 2021]
- Jibson, R.W. (2007). Regression models for estimating coseismic landslide displacement. Engineering Geology, 91, 209-218.
- Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1969). Soil Mechanics, John Wiley & Sons, New York.
- Lazarou, G., Loukidis, D., & Bardanis, M. (2019). Moisture migration under mat foundations in Nicosia Marl. Geotechnical and Geological Engineering, 37(3), 1585-1608.
- Lupini, J. F., Skinner, A. E. & Vaughan, P. R. (1981). The drained residual strength of cohesive soils. Géotechnique, 31(2), 181–213.
- Marinos P, Hoek E. (2000) GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. Proc. International Conference on Geotechnical & Geological Engineering GeoEng2000, Melbourne, 1422-1442.
- Marinos, P. & Hoek E (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. In: Bull Eng Geol Env, 60, 82–92.
- McCalpin, J. (1984). Preliminary age classification of landslides for inventory mapping. Proceedings 21st Annual Engineering Geology and Soils Engineering Symposium (pp. 5-6).
- Newmark, N. M. (1965). Effects of earthquakes on dams and embankments. Geotechnique, 15(2), 139-160.
- Northmore, K.J, Charalambous, M., Hobbs P.R.N., Petridis G. (1986). Engineering geology of the Kannaviou, ‘Mélange’ and Mamonnia Complex formations-Phiti/Statos area, SW Cyprus. Engineering geology of cohesive soils associated with ophiolites, with particular reference to Cyprus, British Geological Survey, Report EGARP-KW/86/4.
- Popescu, M.E., 2002. Landslide causal factors and landslide remedial options. Proc. 3rd International conference on landslides, slope stability and safety of infrastructures, Singapore, 61-81. [online] Διαθέσιμο από : https://www.geoengineer.org/storage/publication/19461/publication_file/2727/Lanslides-Popescu.pdf [24 Μαρτίου 2021]

- Rathje, E.M. and Saygili, G. (2009). Probabilistic assessment of earthquake-induced sliding displacements of natural slopes. *Bulletin of the New Zealand Society of Earthquake Engineering*, 41, 18-27.
- Saygili, G. and Rathje, E. M. (2009). Probabilistically based seismic landslide hazard maps: an application in Southern California. *Engineering Geology*, 109(3-4), 183-194.
- Skempton, A. W. (1985). Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. *Géotechnique*, 35(1), 3-18.
- Stow, D., Braakenburg, N., Xenophontos, C. (1995). The Pissouri Basin fan-delta complex, southwestern Cyprus. *Sedimentary Geology*, 98, 245-262.
- Tika, T. E., Vaughan, P. R. and Lemos, L. J. L. J. (1996). Fast shearing of pre-existing shear zones in soil. *Geotechnique*, 46(2), 197-233.
- UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (1993). A suggested method for describing the activity of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 47, 53-57. [online] Διαθέσιμο από : <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02639593> [22 Μαρτίου 2021]
- Varnes, D.J. (1978). Slope Movement Types and Processes. In: Schuster, R.L. and Krizek, R.J., Eds., *Landslides, Analysis and Control*, Transportation Research Board Special Report No. 176, National Academy of Sciences, 11-33. [online] Διαθέσιμο από: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr176/176-002.pdf> [22 Μαρτίου 2021]
- Wesley, L. D. (2003). Residual strength of clays and correlations using Atterberg limits. *Geotechnique*, 53(7), 669-672.
- Zaruba, Q., Mencl, V., (1976). *Engineering Geology*, Elsevier, pp. 504. [online] Διαθέσιμο από : <https://www.elsevier.com/books/engineering-geology/zaruba/978-0-444-99877-4>

Ελληνική βιβλιογραφία

- Ευθυμίου, Μ., Χατζηχαραλάμπους, Κ., (2013). Κατολισθήσεις στην Κύπρο και οι συνέπειες στο δομημένο περιβάλλον, Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης. [online] Διαθέσιμο από : [http://www.moa.gov.cy/moa/gsd/gsd.nsf/All/D9A0E192008CAED8C22583910041810A/\\$file/landslidesCyprus%20GR.pdf?OpenElement](http://www.moa.gov.cy/moa/gsd/gsd.nsf/All/D9A0E192008CAED8C22583910041810A/$file/landslidesCyprus%20GR.pdf?OpenElement) [27 Μαρτίου 2021]
- Κούκης, Γ., Σαμπατακάκης, Ν. (2002). *Τεχνική Γεωλογία*, Αθήνα: Παπασωτηρίου.
- Λαζάρου (2020). Μελέτη επίδρασης της διόγκωσης/συρρίκνωσης των αργίλων στην ανάλυση και σχεδιασμό γενικών κοιτοστρώσεων. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Κύπρου.
- Λουκίδης, Δ., Ιταλός, Χ., Παπαναστασίου, Π. & Λαζάρου, Γ. (2014). Ανάλυση και σχεδιασμός μέτρων σταθεροποίησης κατολισθησης στον Αναλιόντα Επαρχίας Λευκωσίας. Πρακτικά 7ου Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής, Αθήνα, Ελλάδα, Άρθρο Χ.8 (CD-ROM).

- Μεγάλη Κυπριακή Εγκυκλοπαίδεια (2021). Πισσούρι. [online] Διαθέσιμο από : <http://www.polignosi.com/cgi-bin/hweb?-A=8874&-V=limmata> [5 Απριλίου 2021]
- Μιχαηλίδης Π. & Κύρου, Κ. (1992). Γεωλογική-γεωτεχνική μελέτη (1991/92) για τα αίτια αποσταθεροποίησης των κτιρίων της Παιδαγωγική Ακαδημίας Κύπρου - Πανεπιστήμιο Κύπρου. Έκθεση G/EG/6/92, Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης, Υπουργείο Γεωργίας και Φυσικών Πόρων.
- Νικολαΐδης & Συνεργάτες (2010). Μελέτη σκοπιμότητας και μελέτη επιπτώσεων στο περιβάλλον για τα αποχετευτικά συστήματα Πισσουρίου, Αυδήμου και Πραστέιου Αυδήμου. [online] Διαθέσιμο από : [http://www.moa.gov.cy/moa/environment/environmentnew.nsf/All/EA6757ECB31BA8B9C2257F37003FBD96/\\$file/MP20101770101.pdf?OpenElement](http://www.moa.gov.cy/moa/environment/environmentnew.nsf/All/EA6757ECB31BA8B9C2257F37003FBD96/$file/MP20101770101.pdf?OpenElement)
- Πιτιλάκης, Κ., Αναστασιάδης, Α., Απέσσου, Μ. (2000). Μικροζωνική μελέτη της ευρύτερης αστικής περιοχής Λεμεσού. Ερευνητικό Πρόγραμμα ΚΩΔ.Ε.Ε.Α.Π.Θ.: 7428, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Πιτιλάκης, Κ., Αναστασιάδης, Α., Βελδεμίρη, Μ. (2005). Μικροζωνική μελέτη της ευρύτερης αστικής περιοχής Πάφου. Ερευνητικό Πρόγραμμα ΚΩΔ.Ε.Ε.Α.Π.Θ.: 20867, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Στατιστική Υπηρεσία (2011). Απογραφή πληθυσμού. [online] Διαθέσιμο από : https://www.mof.gov.cy/mof/cystat/statistics.nsf/populationcondition_22main_gr/populationcondition_22main_gr?OpenForm&sub=2&sel=2 [5 Απριλίου 2021]
- Σταυροπούλου, Μ. (2015). Τεχνική Γεωλογία. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Συμβούλιο Υδατοπρομήθειας Λεμεσού (2021). Έκθεση διετίας 2014-2015. [online] Διαθέσιμο από : https://www.wbl.com.cy/index.php/en/file/nfugSUVocOjGpdeP_+CepQ==/
- Συμβούλιο Υδατοπρομήθειας Λεμεσού (2021). Έκθεση διετίας 2016-2017. [online] Διαθέσιμο από : https://www.wbl.com.cy/index.php/en/file/q+G0+J9+_aPGpdeP_+CepQ==/21
- Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης (2004). Χάρτης Σεισμικότητας. [online] Διαθέσιμο από: <http://www.moa.gov.cy/moa/gsd/gsd.nsf/All/C694742CF9198A2EC22583C400252478?OpenDocument> [7 Απριλίου 2021]
- Τμήμα Κτηματολογίου και Χωρομετρίας Υπουργείου Εσωτερικών (2021). [online] Διαθέσιμο από: <https://eservices.dls.moi.gov.cy/#/national/geoportalmapviewer>
- Τμήμα Μετεωρολογίας (2018). Μέγιστη, ελάχιστη θερμοκρασία και βροχόπτωση σε ημερήσια βάση. [online] Διαθέσιμο από : <https://www.data.gov.cy/dataset/%CE%BC%CE%AD%CE%B3%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%B7-%CE%B5%CE%BB%CE%AC%CF%87%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%B7-%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%BF%CE%BA%CF%81%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-%CE%B2%CF%81%CE%BF%CF%87%CF%8C%CF%80%CF%84%CF%89%CF%83%CE%B7-%CF%83%CE%B5->

[%CE%B7%CE%BC%CE%B5%CF%81%CE%AE%CF%83%CE%B9%CE%B1-%CE%B2%CE%AC%CF%83%CE%B7](#) [3 Απριλίου 2021]

ΕΠΑΜΕΙΝΩΝΔΑΣ ΚΑΡΛΑΣ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

**ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ ΑΡΓΙΑΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ**

Πίνακας Π.1. Βάση δεδομένων παραμένουσας γωνίας τριβής ϕ_R αργιλικών υλικών της Κύπρου.

Πηγή	Κωδικός	Ιλύς(%)	Άμμος(%)	Άργιλος (%)	LL(%)	PI(%)	Παραμένουσα γωνία τριβής ϕ_R (°)			
							$\sigma'_n=76\text{kPa}$	$\sigma'_n=150\text{kPa}$	$\sigma'_n=248\text{kPa}$	$\sigma'_n=497\text{kPa}$
Northmore et al. (1986)	PIT24-P24/2	61	0	39	71 ⁺	47 ⁺	19.6	18.2	16.6	15.0
	PIT22-P22/1	38	9	42	60	39	13.4	12.5	12.4	11.5
	PIT4-P4/1	46	18	36	79	55	18.0	15.1	13.7	12.5
	EG25/84-BH105	38	19	42	73	47	21.2	18.0	16.0	13.6
	EG28/84-BH155	62 ⁺	0 ⁺	38 ⁺	90	51	26.4	25.5	24.0	22.6
	EG18/84-BH45	60	15	25	113	64	22.3	19.5	15.4	14.1
	EG28/84-BH145	48 ^Δ	0 ^Δ	52 ^Δ	78	44	31.6	31.2	29.7	28.4
	EG20/84-BH62	37	9	53	55	28	21.4	18.0	16.0	13.6
	EG29/84-85/27	48	1	51	110	53	18.2	15.5	12.7	11.3
	EG28/84-BH151	62	0	38	125	72	20.7	17.7	17.5	15.4
	EG13/84-BH36/1	25	43	16	36	21	23.8	23.3	23.1	22.4
	PIT13-P13/2	52	3	45	116	76	19.2	16.5	14.7	12.1
	PIT6-P85/6A	18	2	79	63	40	18.0	15.0	14.6	13.0
	EG22/84-BH80	46	3	51	120	75	19.5	17.5	15.6	14.1
	EG29/84-85/16	62	6	21	35	15	26.2	23.9	23.9	20.8
	EG28/84-BH149	35	0	65	112	61	11.2	7.7	7.7	6.5
	EG10/84-BH18	24	49	21	154	111	23.2	20.1	16.4	13.6
	EG25/84-BH109	34	11	52	141	95	12.2	10.7	8.6	7.8
	EG18/84-BH51	44	0	56	134	97	15.3	12.6	11.2	9.7
	84/3F	34	3	64	198	48	13.0	10.3	9.8	8.3
EG29/84-85/1	40	14	46	170	101	21.7	19.2	16.8	15.3	

Πίνακας Π.1. (συνέχεια)

Πηγή	Κωδικός	Ιλύς(%)	Άμμος(%)	Άργιλος (%)	LL(%)	PI(%)	Παραμένουσα γωνία τριβής ϕ_R (°)			
							$\sigma'_n=76\text{kPa}$	$\sigma'_n=150\text{kPa}$	$\sigma'_n=248\text{kPa}$	$\sigma'_n=497\text{kPa}$
Northmore et al. (1986)	EG28/84-BH147	48 ^Δ	0 ^Δ	52 ^Δ	168	114	17.7	14.6	13.7	12.7
	EG13/84-BH40	45*	5*	50*	182*	135*	19.5	15.2	14.8	13.5
	84/3A	15	2	83	169	124	20.9	16.5	14.5	12.4
	PIT14-P14/1	34	0	66	207 ⁺	153 ⁺	14.3	11.8	10.4	10.1
	EG29/84-85/15	93	1	6	32	10	18.1	17.5	16.6	15.6
Charalambous et al. (1986)	E3	63	2	35	128	84	32.8	32.7	32.7	32.9
	E4	50	10	39	105	64	21.3	18.9	17.2	15.0
	E11	25	1	74	298	257	15.5	13.0	11.8	10.5
	E12	31	4	65	210	159	14.7	12.9	11.5	10.8
	E17	22	1	77	237	190	13.6	11.5	9.5	8.9
	E18	79	8	13	67	38	32.9	31.3	29.9	29.8
	E20	26	2	72	134	88	24.0	22.3	20.5	18.9
	E21	50	6	44	196	148	24.2	22.0	20.9	19.1
	E24	64	11	25	53	28	32.7	31.8	31.7	31.4
	E27	73*	6*	21*	28	28	31.5	29.7	28.9	28.6
	E68	43*	32*	25*	56	35	19.6	16.0	13.6	11.6
E93	47*	8*	45*	47	26	21.7	19.2	16.3	15.3	
Hobbs et al. (1986)	EG 14/82 (11-11.5m)	70	6	24	60	40	27.5	26.6	25.7	23.8
	EG 7/82 (13-13.5m)	65	3	32	65	39	29.0	27.9	26.7	25.0
	EG 7/82 (11-11.5m)	61	8	31	75	43	26.8	24.3	23.0	20.5
Μιχαηλίδης & Κύρου (1992)	EG103/91 - 241/91	46	2	52	105	72	14.0			
Alexandris et al. (2017)	-	-	-	34	68	32	21.0			

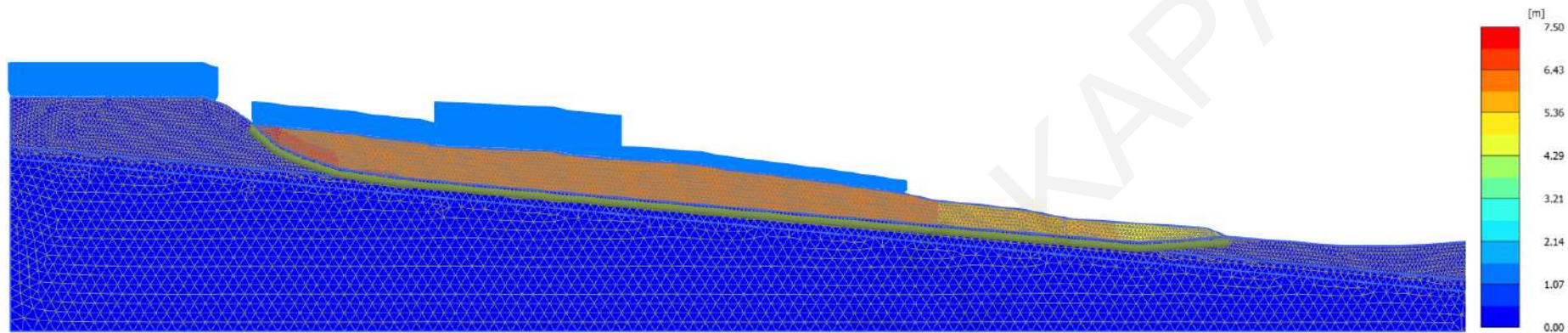
*: τιμές από γειτονική θέση, +: τιμές από άλλο βάθος στην ίδια γεώτρηση, Δ: εκτιμήσεις μέσω παρεμβολής

Πίνακας Π.2. Βάση δεδομένων ενεργών παραμέτρων μέγιστης αντοχής c' , ϕ' αργιλικών υλικών της Κύπρου.

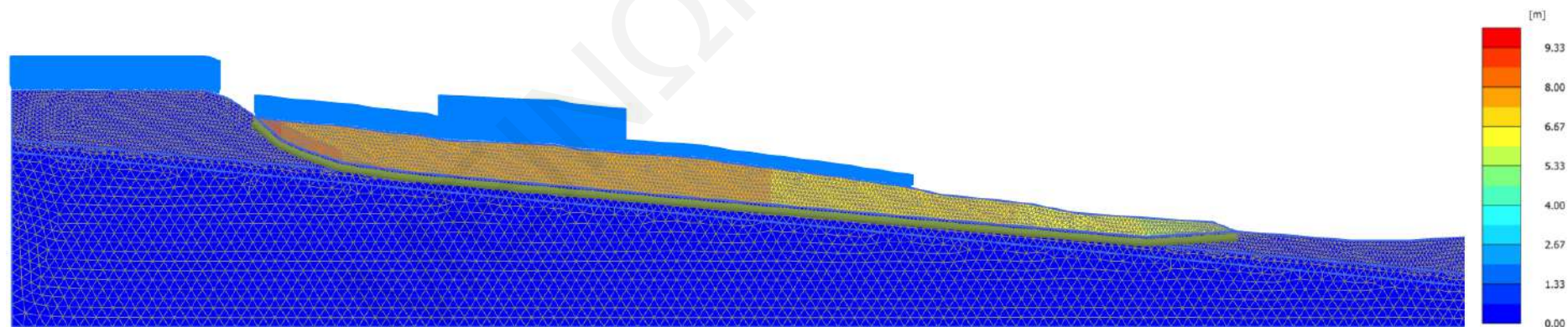
Πηγή	Δείγμα	Ιλύς(%)	Άμμος(%)	Άργιλος (%)	LL(%)	PI(%)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Northmore et al. (1986)	EG26/84-BH121	51	19	27	77	33	18.4	25.0
	EG20/84-BH65	29	16	53	60	33	30.0	13.0
	EG18/84-BH57	62	15	23	102	62	18.0	19.0
	PIT5-P85/5B	18	2	79	59	40	9.0	13.0
	EG22/84-BH78	55	10	35	112	71	50.0	21.0
	EG18/84-BH47	56	3	40	102	75	9.0	18.3
	EG22/84-BH80	46	3	51	120	75	13.0	23.0
	EG25/84-BH109	34	11	52	141	95	4.0	31.7
Μιχαηλίδης & Κύρου (1992)	EG 103/91-231/91	44	28	28	103	68	40.0	40.0
	EG 110/91-242/91	50	2	43	108	72	27.0	34.0
Alexandris et al. (2017)	-	-	-	34	68	32	35.0	21.0
Λαζάρου (2020)	BH1	60	10	30	66	36	64.2	29.3
	P1	62	18	20	48	23	37.6	34.2

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

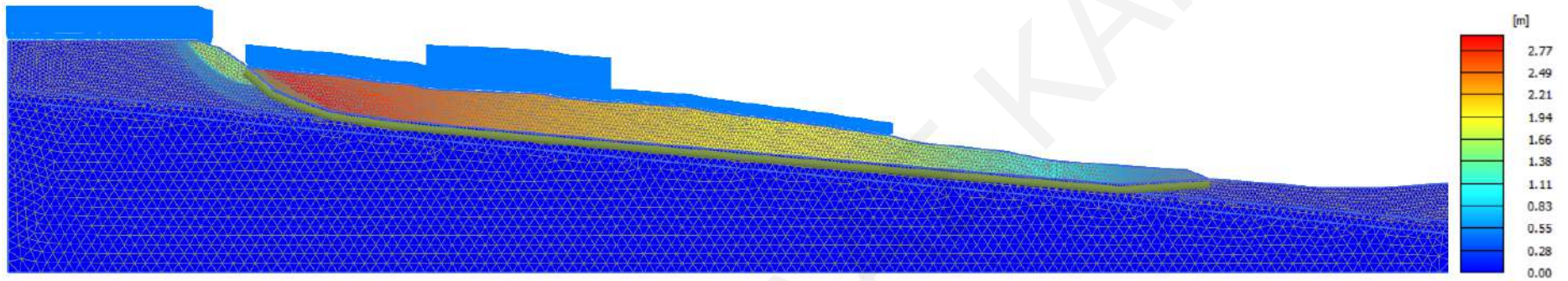
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ PLAXIS 2D



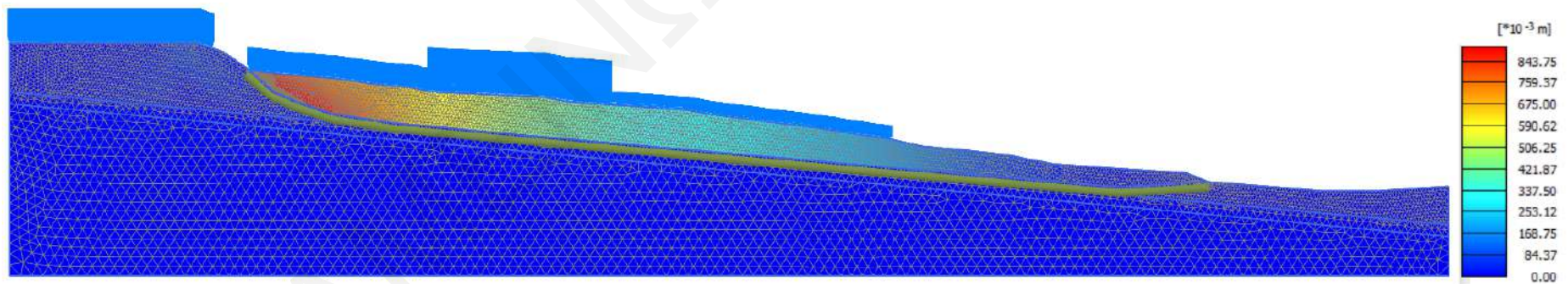
Σχήμα Π.1. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 1.



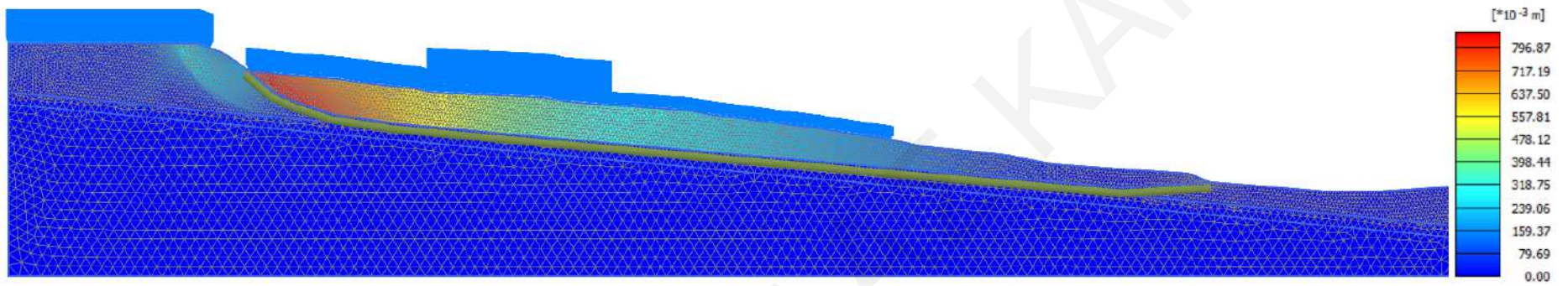
Σχήμα Π.2. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 2.



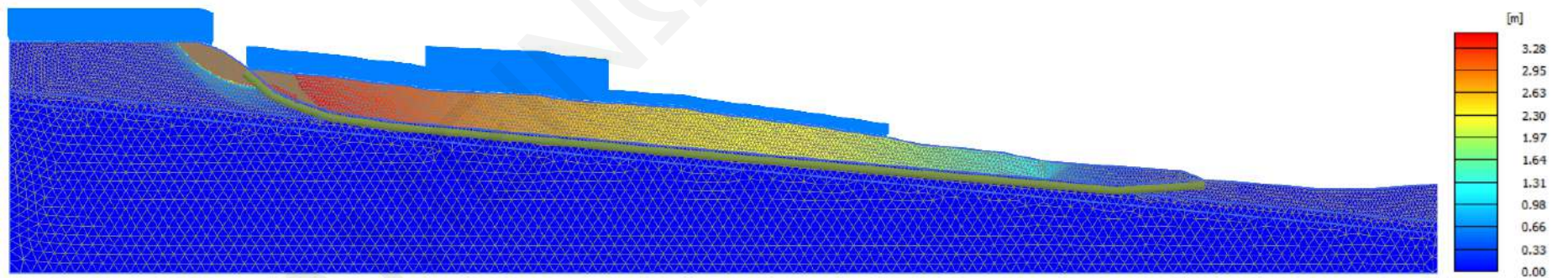
Σχήμα Π.3. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 3.



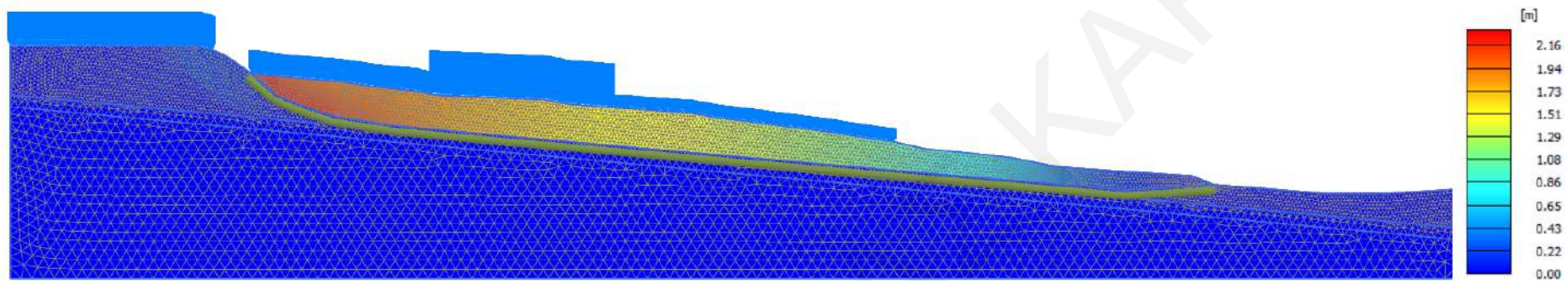
Σχήμα Π.4. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 4.



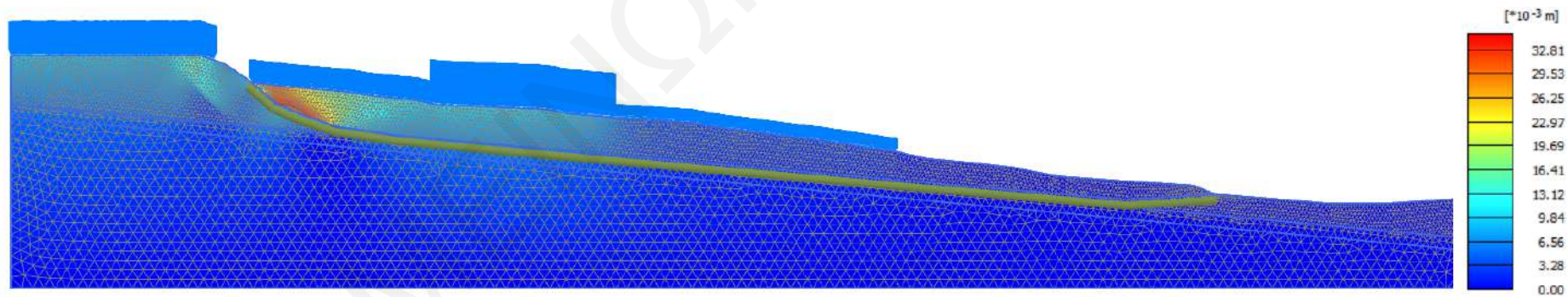
Σχήμα Π.5. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 5.



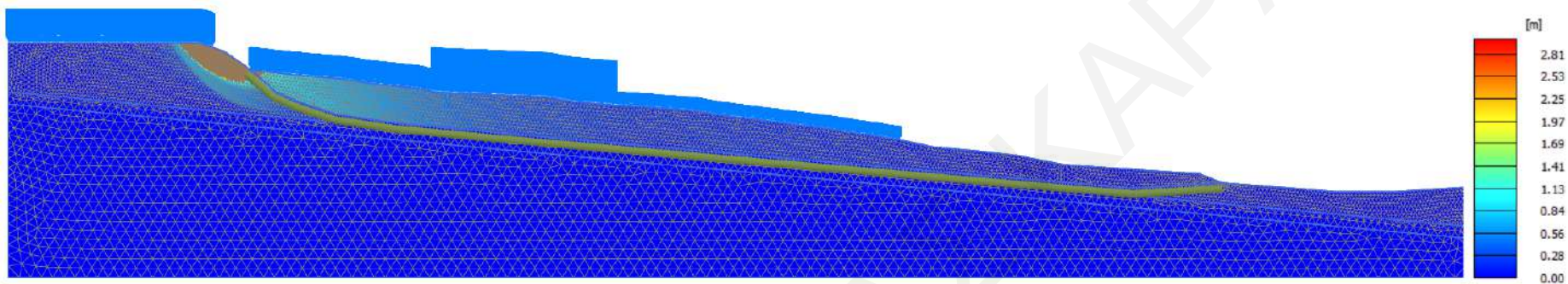
Σχήμα Π.6. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 6.



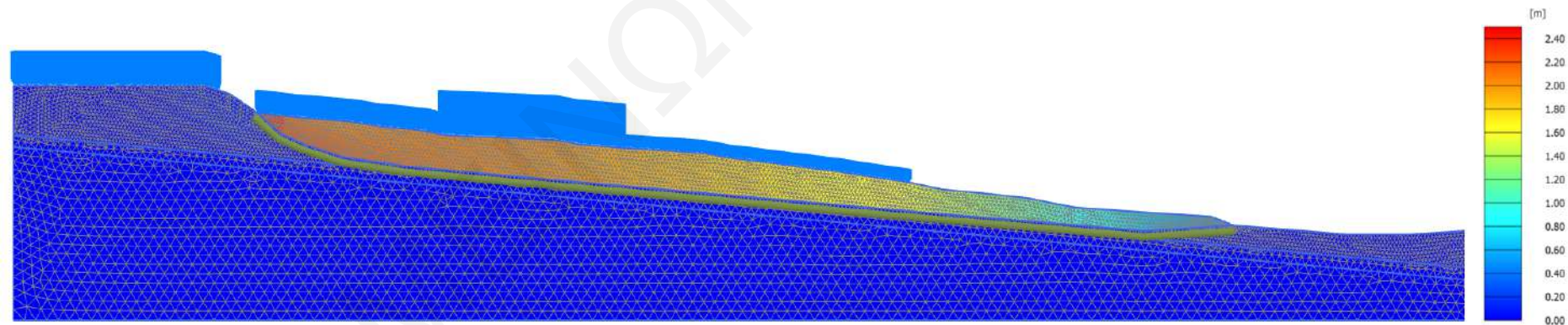
Σχήμα Π.7. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 7.



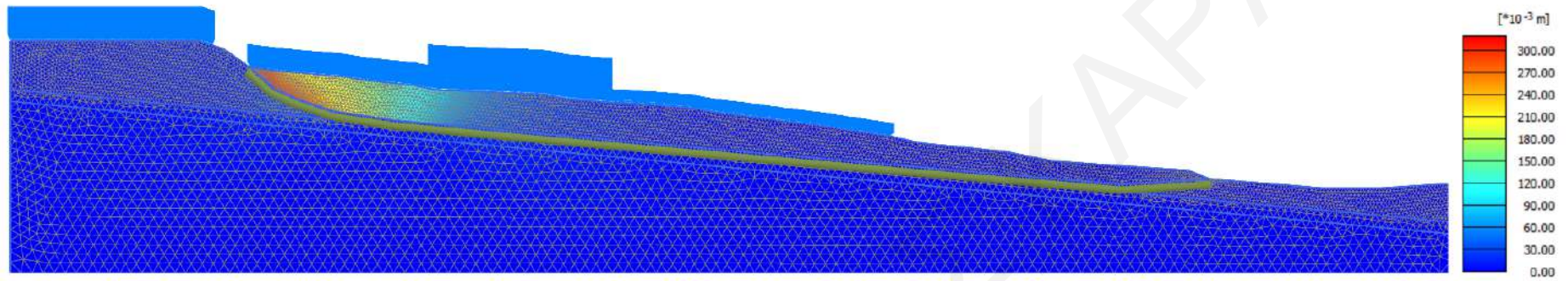
Σχήμα Π.8. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 8.



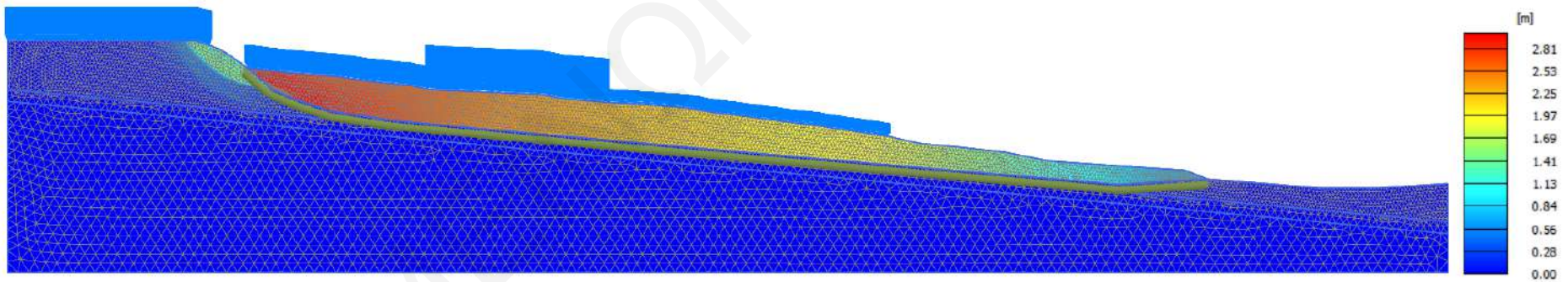
Σχήμα Π.9. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 9.



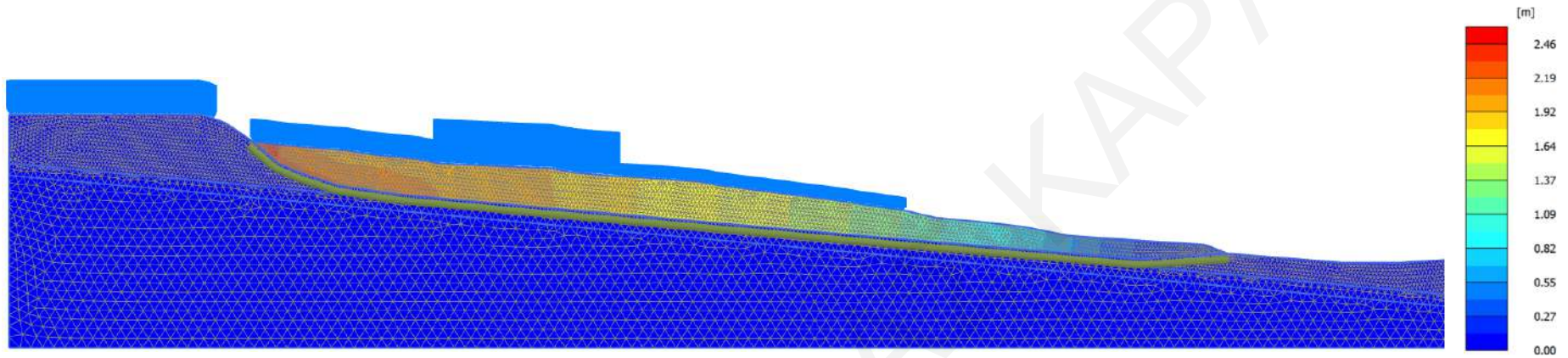
Σχήμα Π.10. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 10.



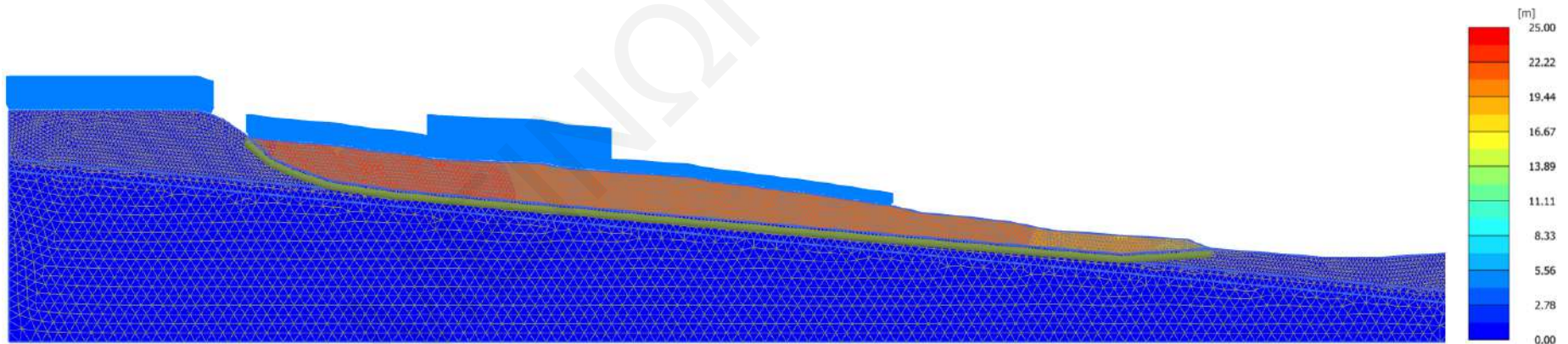
Σχήμα Π.11. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 11.



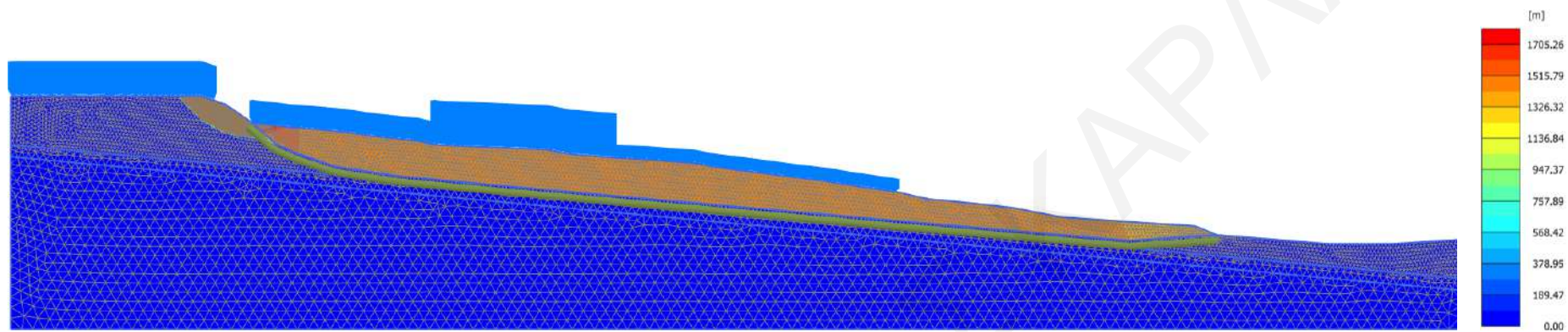
Σχήμα Π.12. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 12.



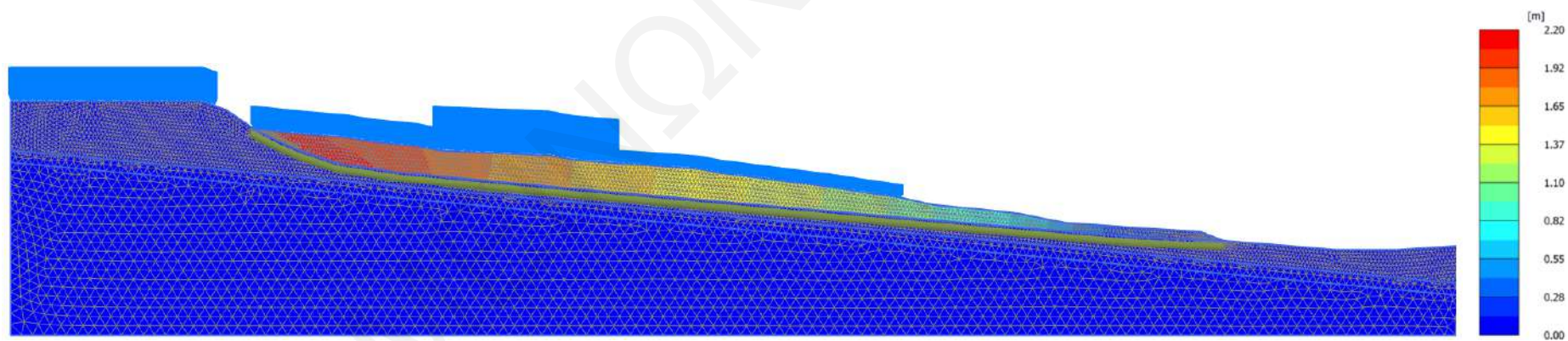
Σχήμα Π.13. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 13.



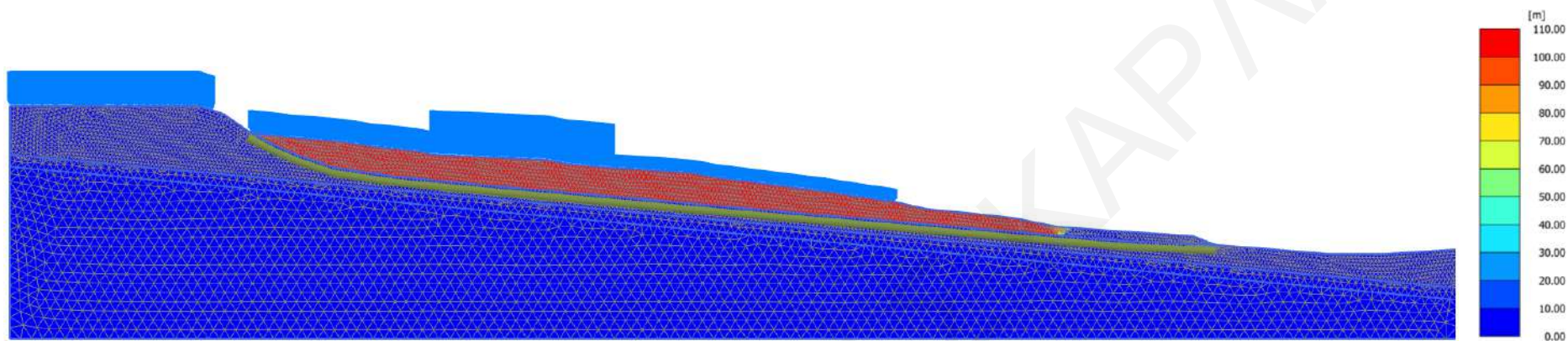
Σχήμα Π.14. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 14.



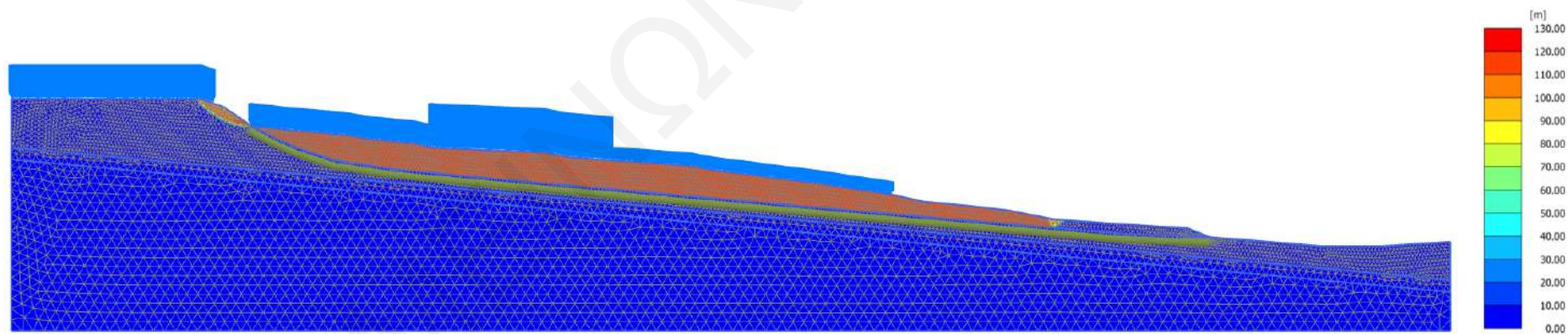
Σχήμα Π.15. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 15.



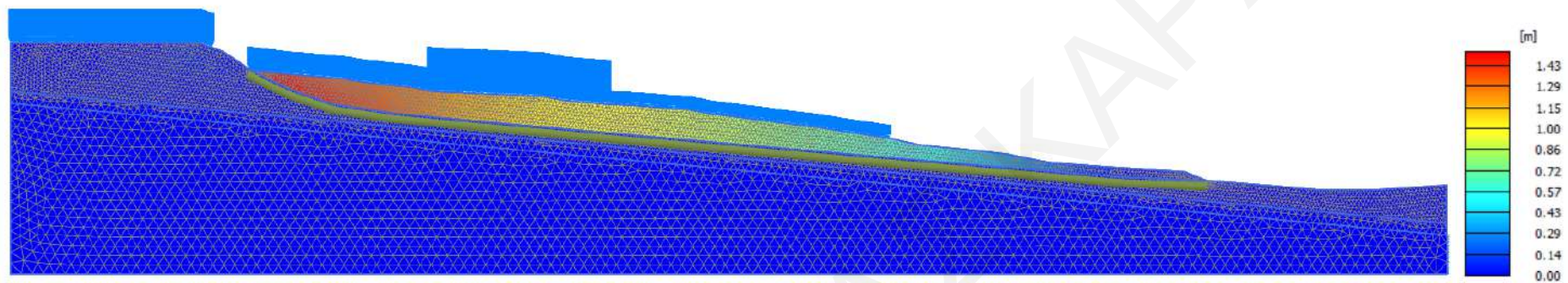
Σχήμα Π.16. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 16.



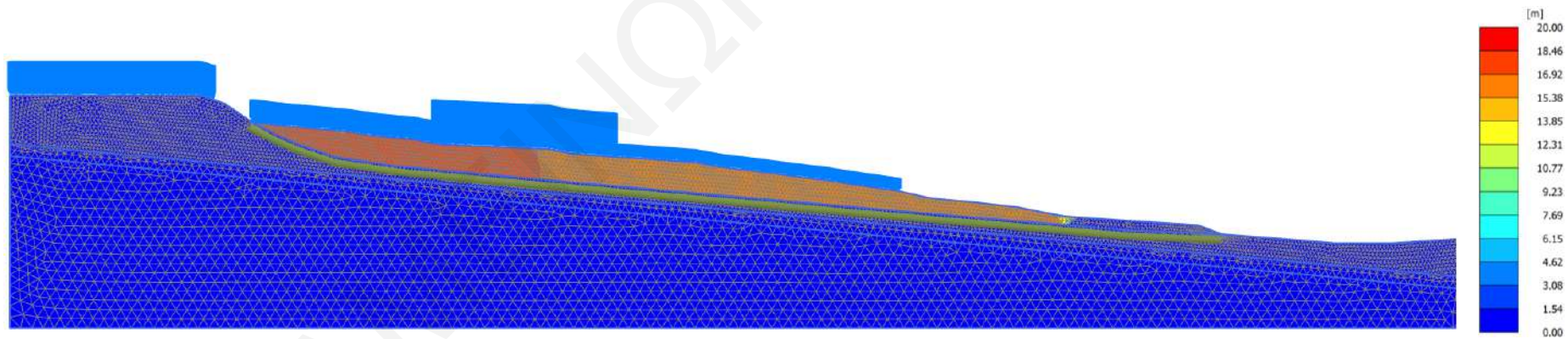
Σχήμα Π.17. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 17.



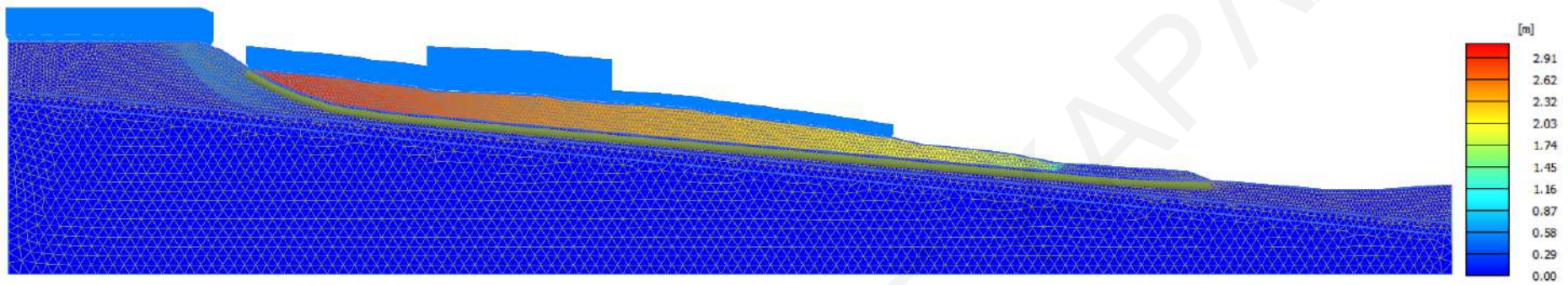
Σχήμα Π.18. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 18.



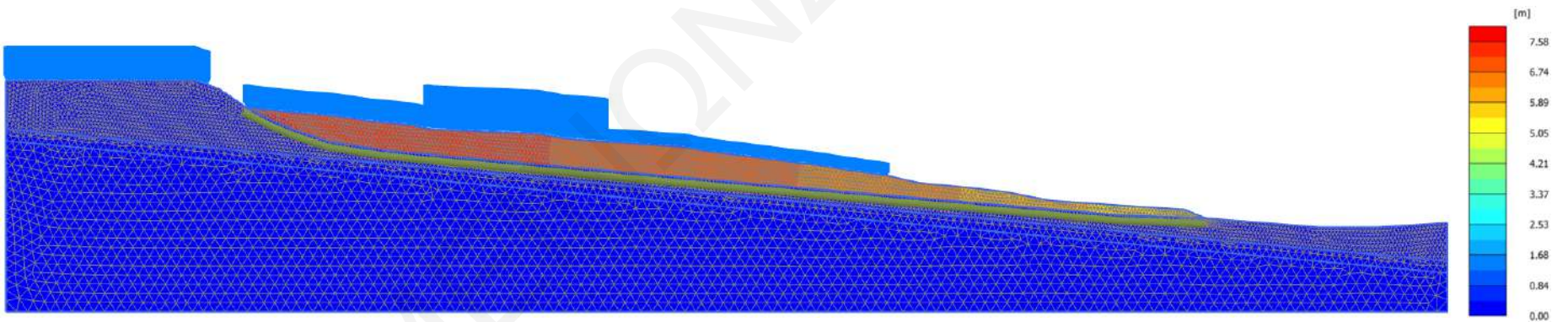
Σχήμα Π.19. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 19.



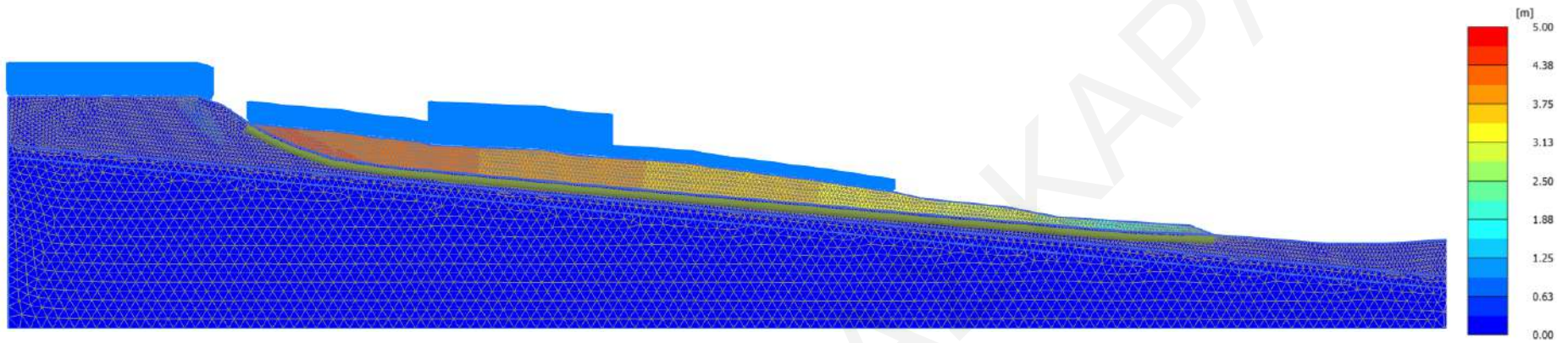
Σχήμα Π.20. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 20.



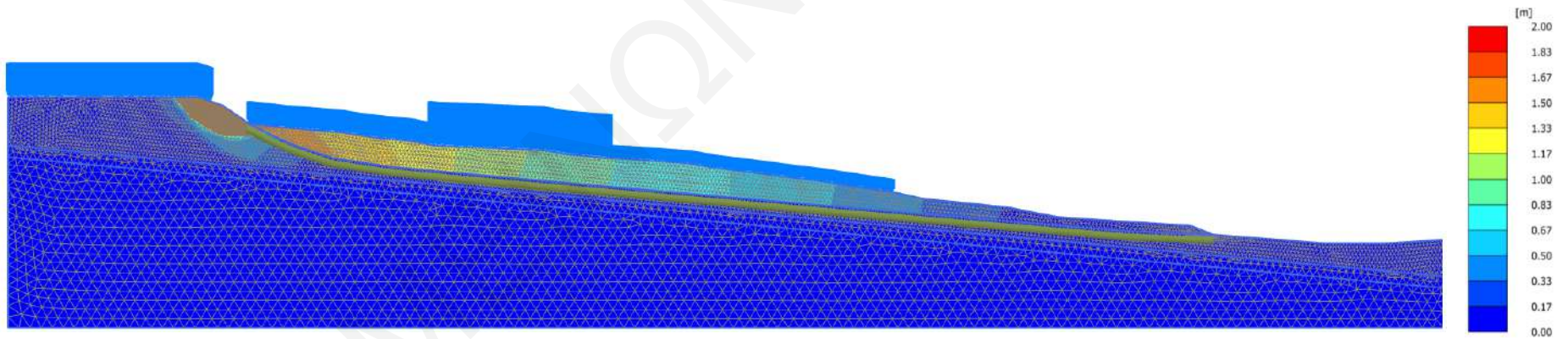
Σχήμα Π.21. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 21.



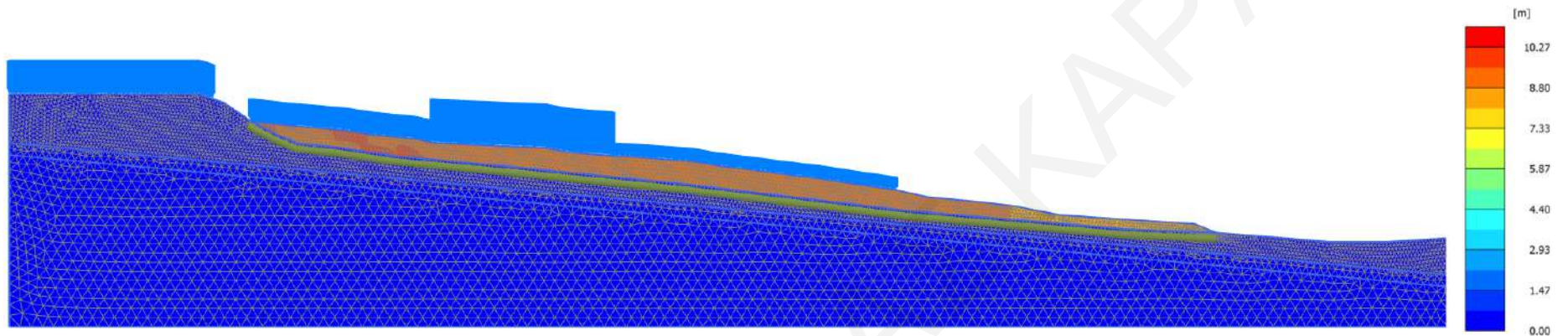
Σχήμα Π.22. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 22.



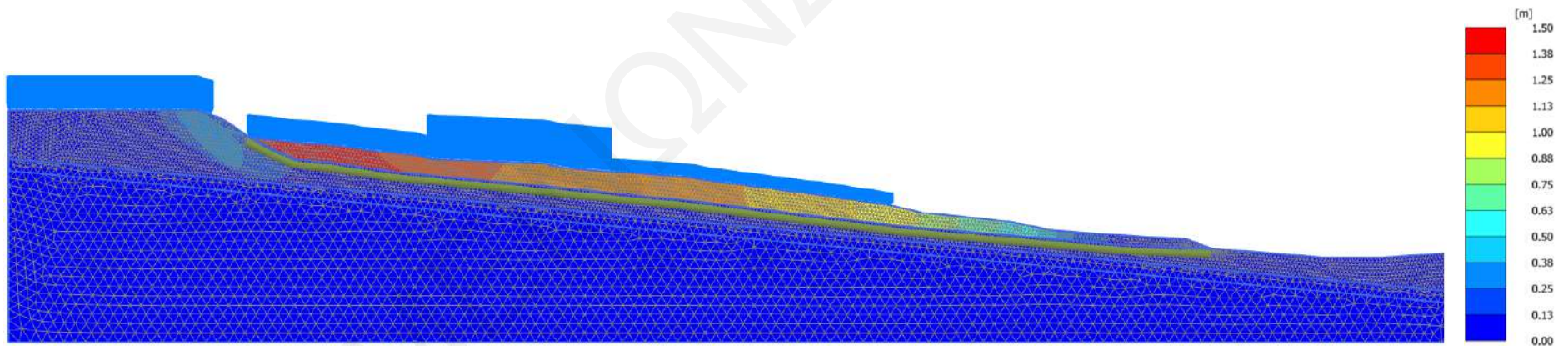
Σχήμα Π.23. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 23.



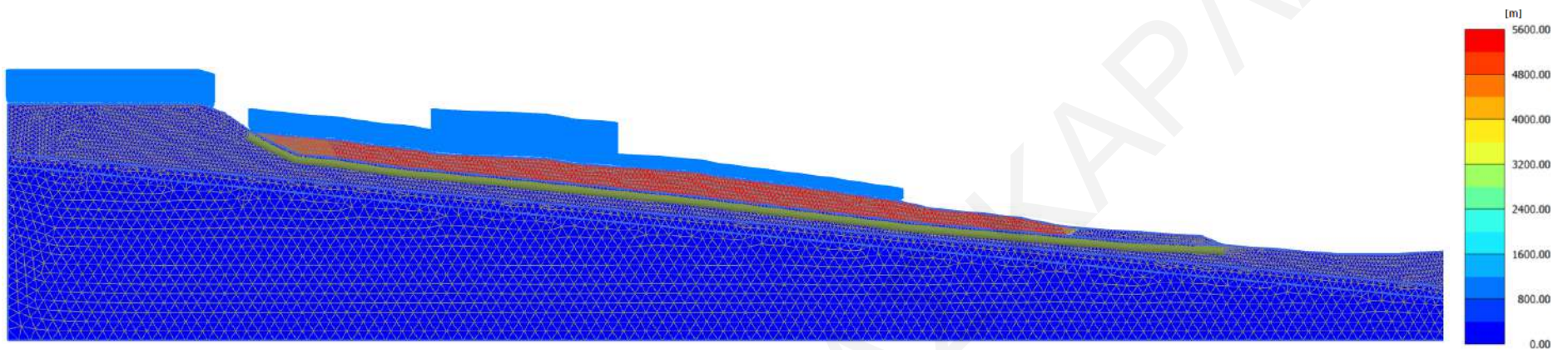
Σχήμα Π.24. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 24.



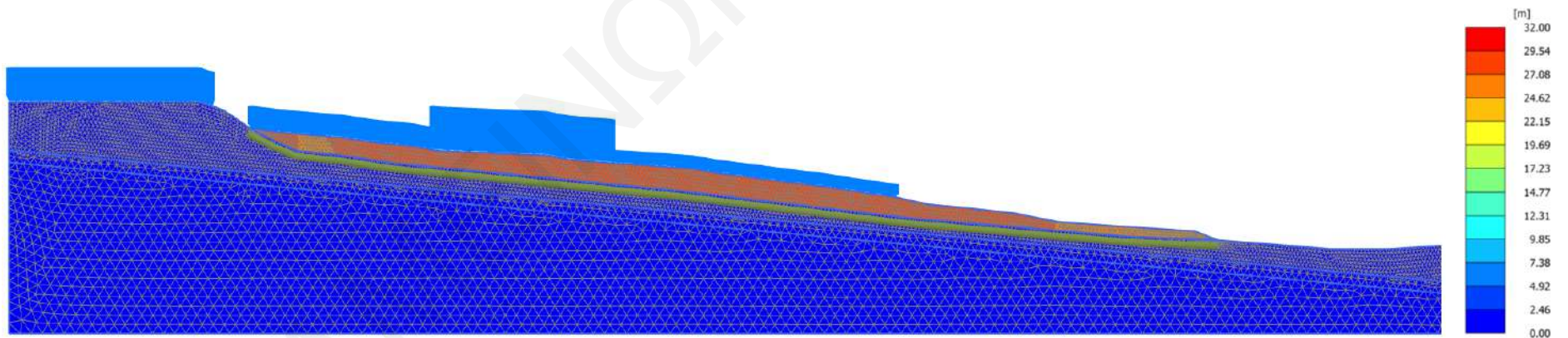
Σχήμα Π.25. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 25.



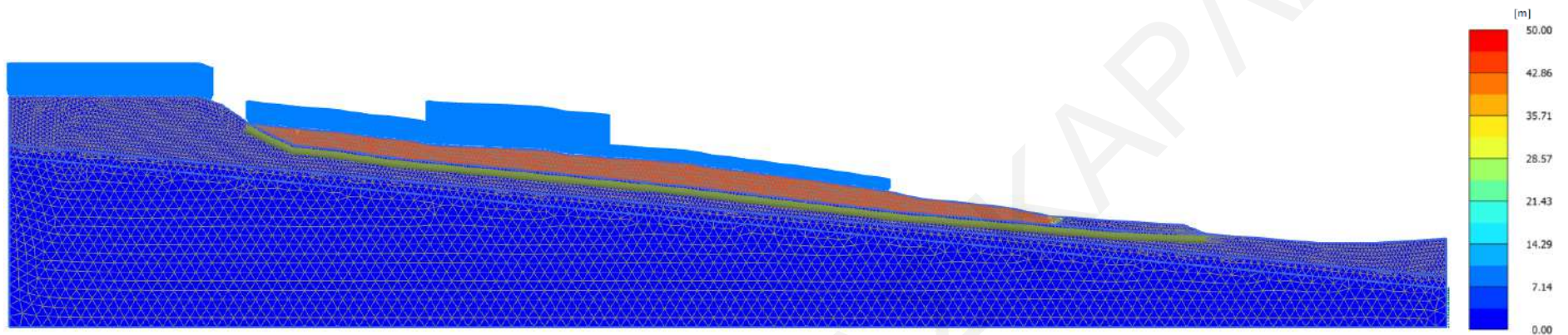
Σχήμα Π.26. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 26.



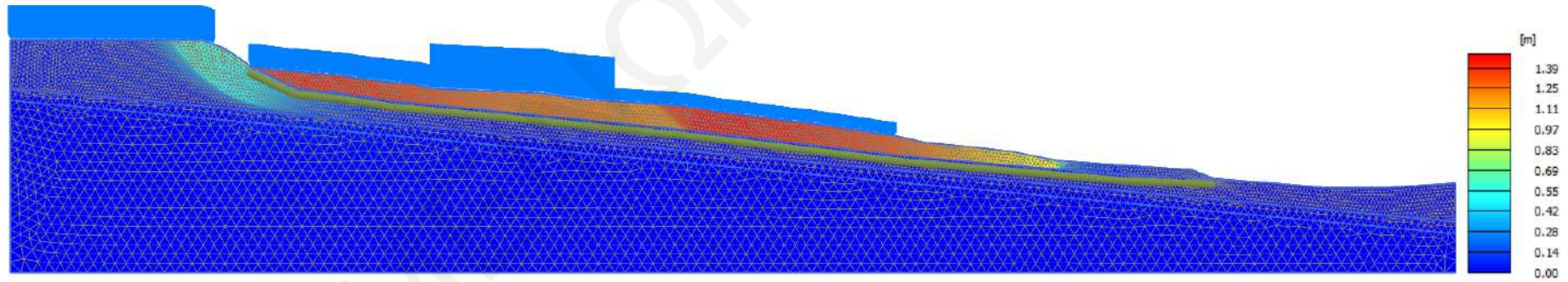
Σχήμα Π.27. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 27.



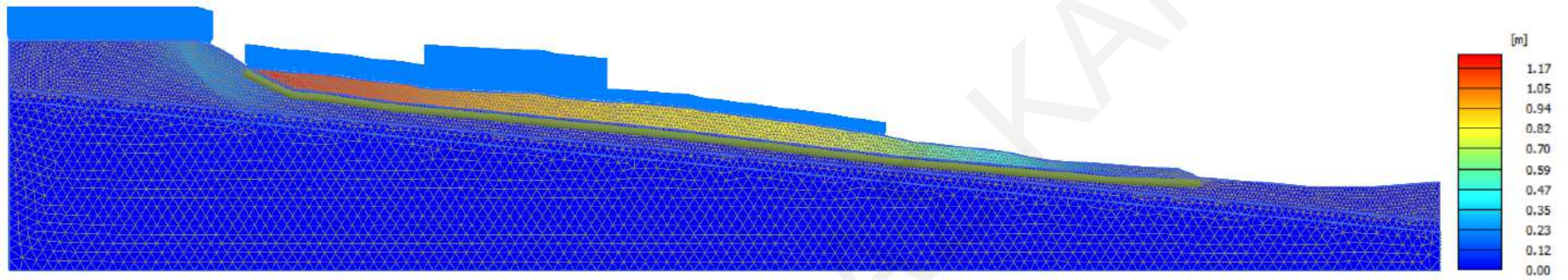
Σχήμα Π.28. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 28.



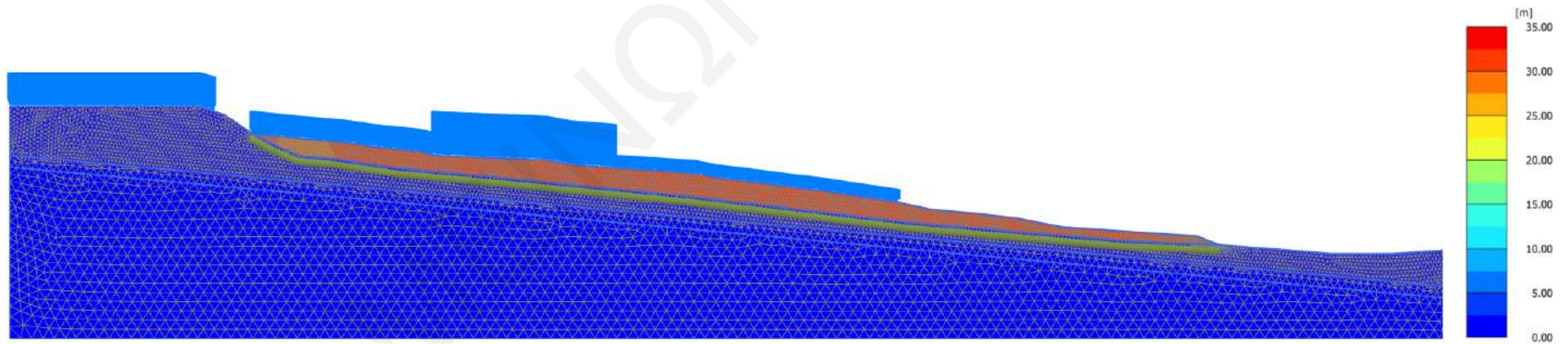
Σχήμα Π.29. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 29.



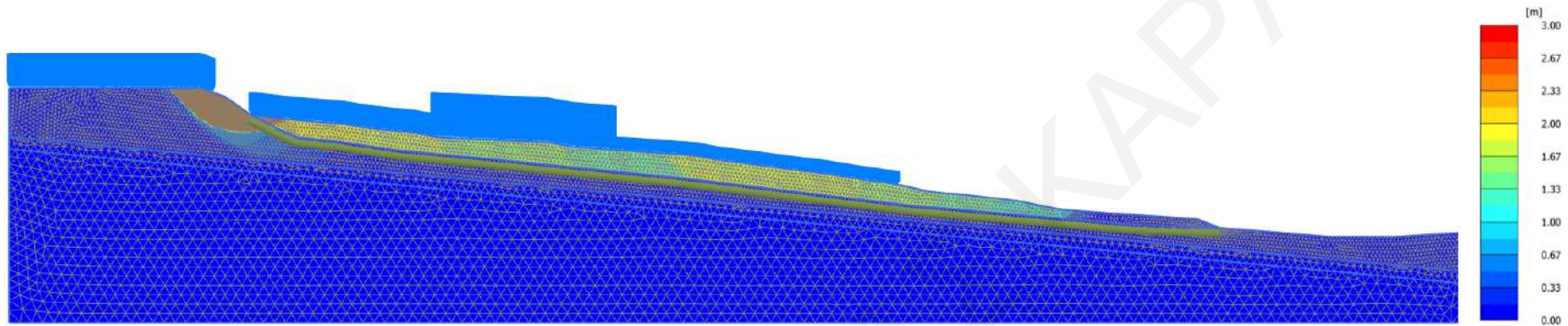
Σχήμα Π.30. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 30.



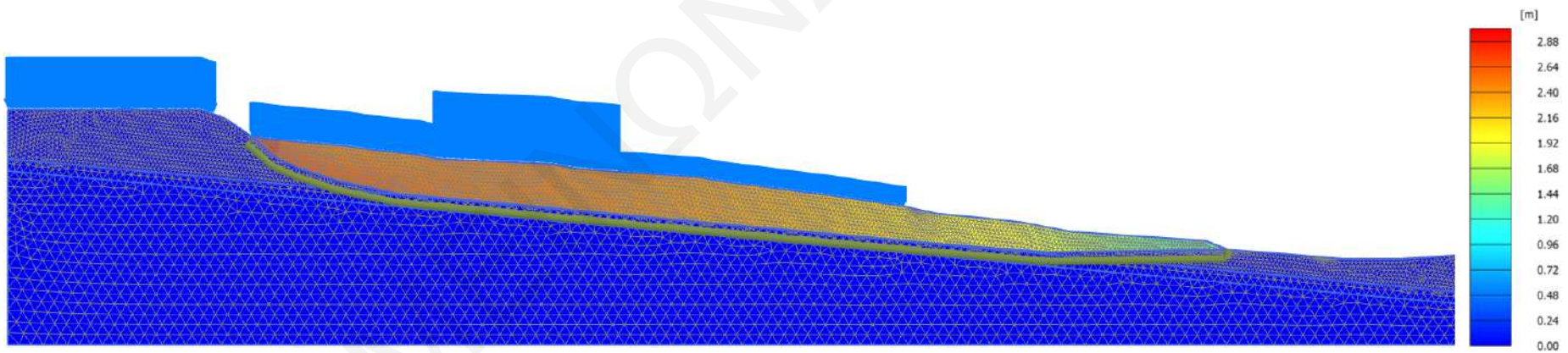
Σχήμα Π.31. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 31.



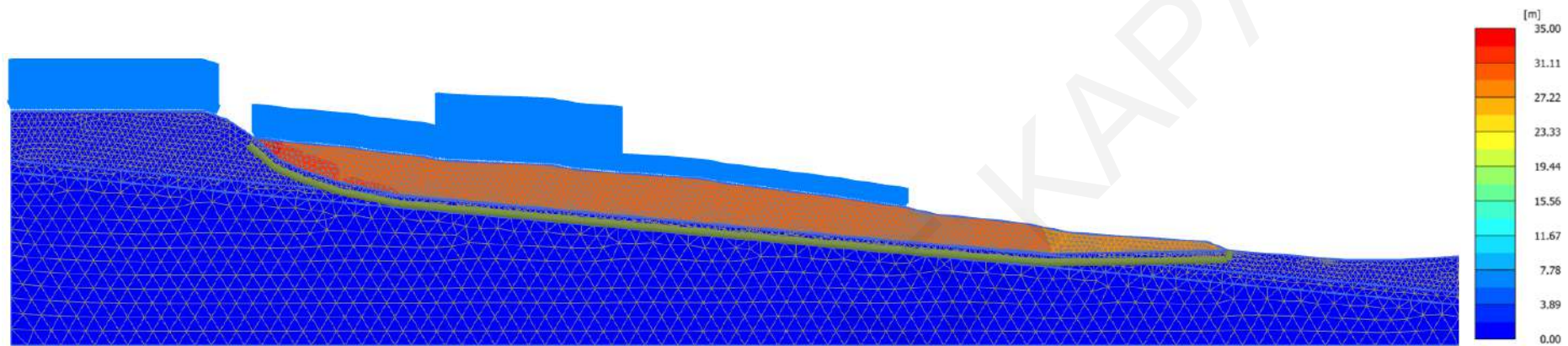
Σχήμα Π.32. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 32.



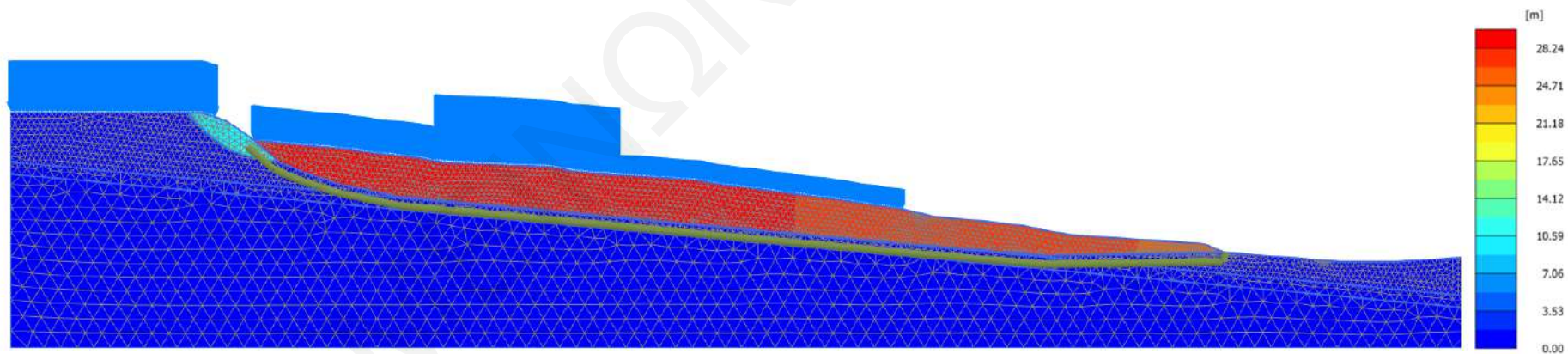
Σχήμα Π.33. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 33.



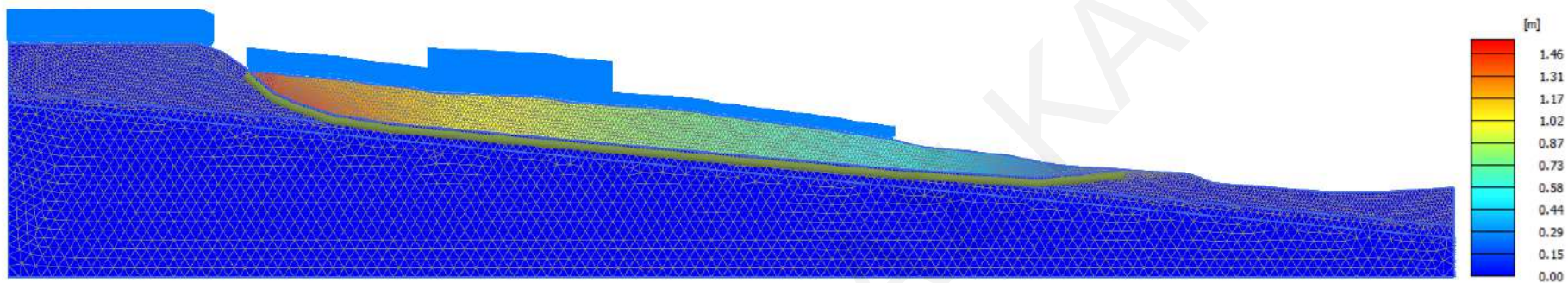
Σχήμα Π.34. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 34.



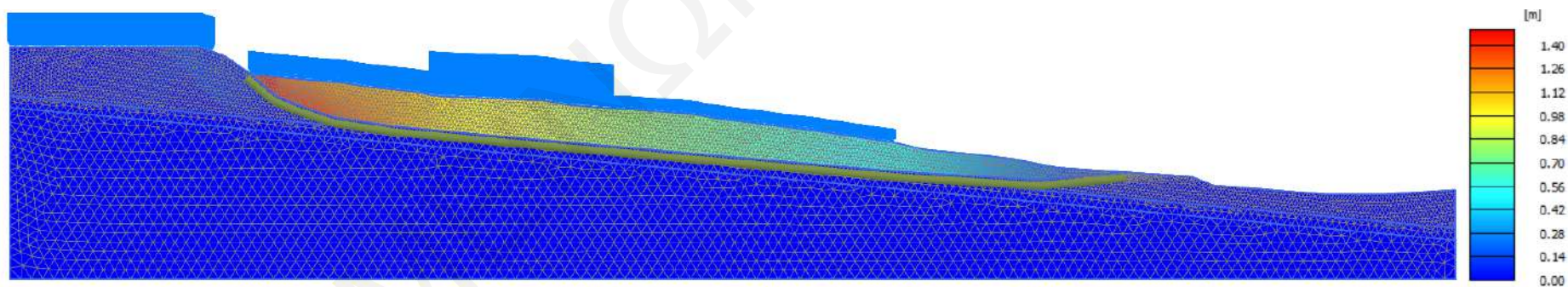
Σχήμα Π.35. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 35.



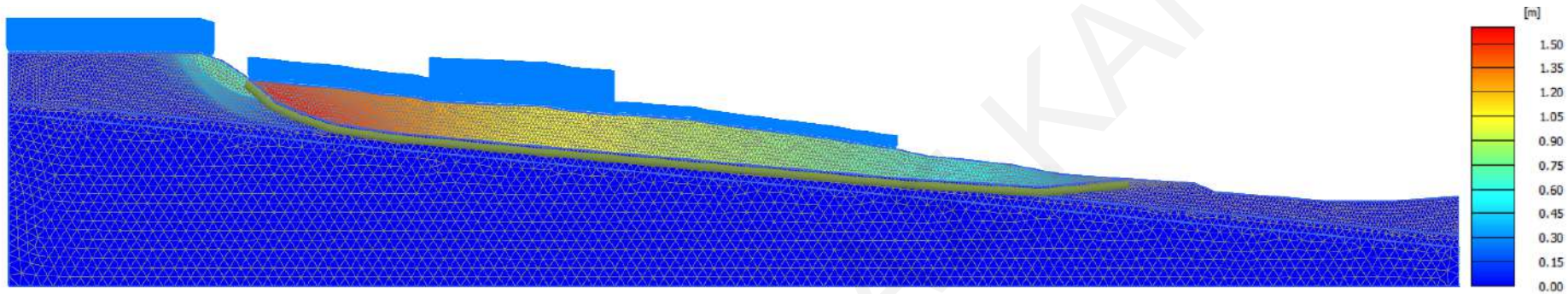
Σχήμα Π.36. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 36.



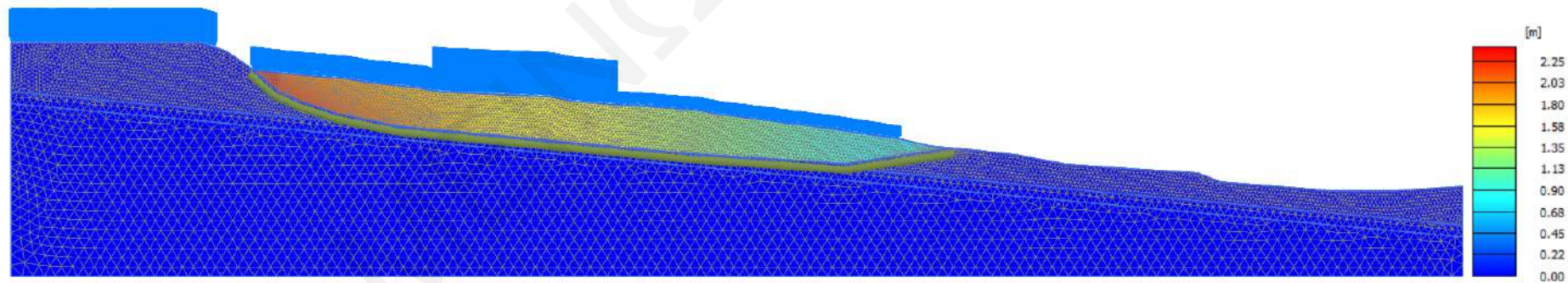
Σχήμα Π.37. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 37.



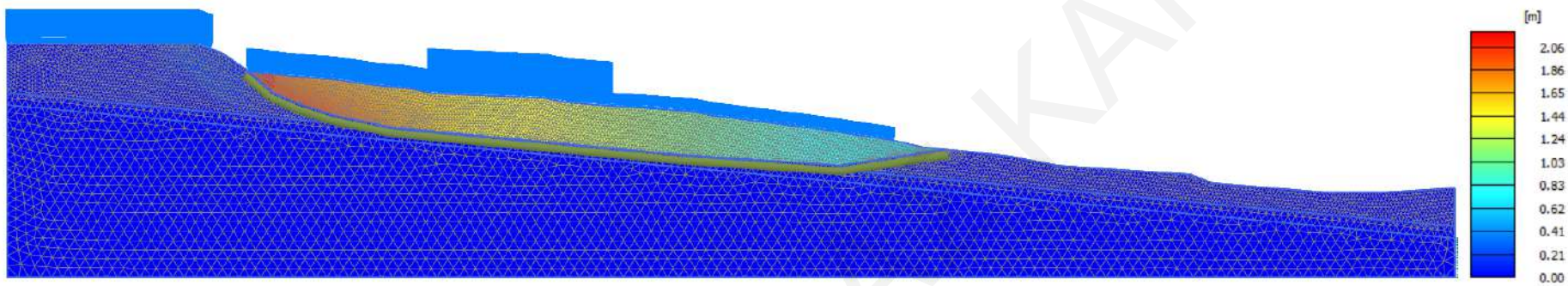
Σχήμα Π.38. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 38.



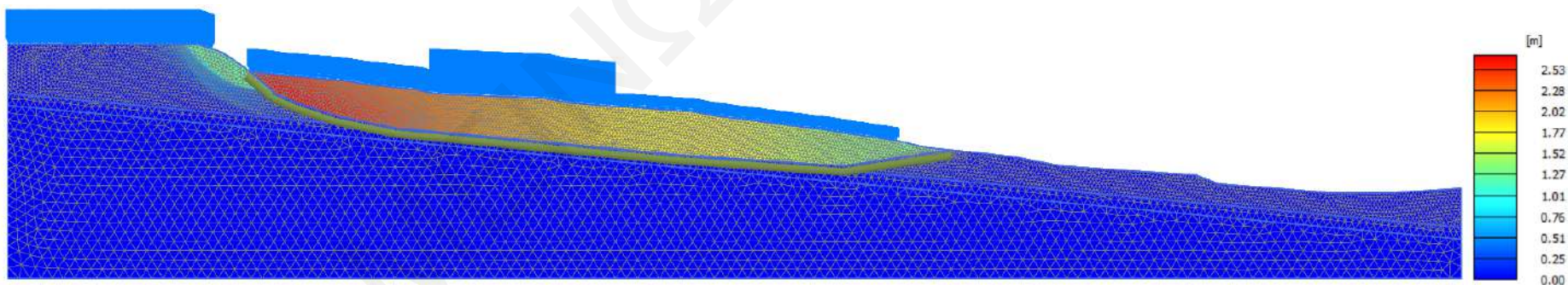
Σχήμα Π.39. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 39.



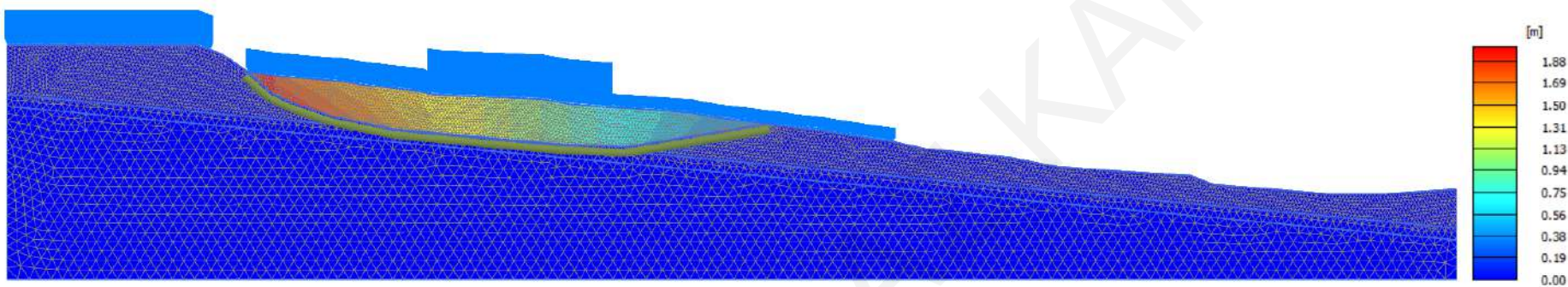
Σχήμα Π.40. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 40.



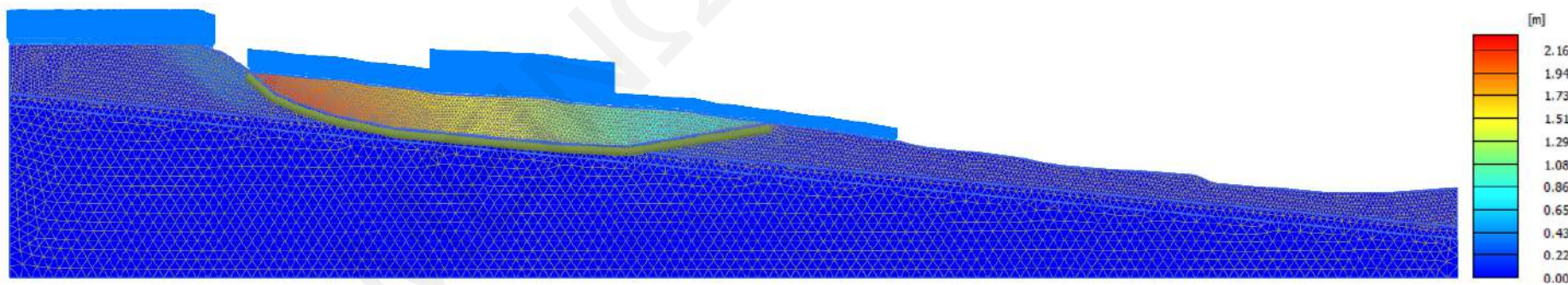
Σχήμα Π.41. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 41.



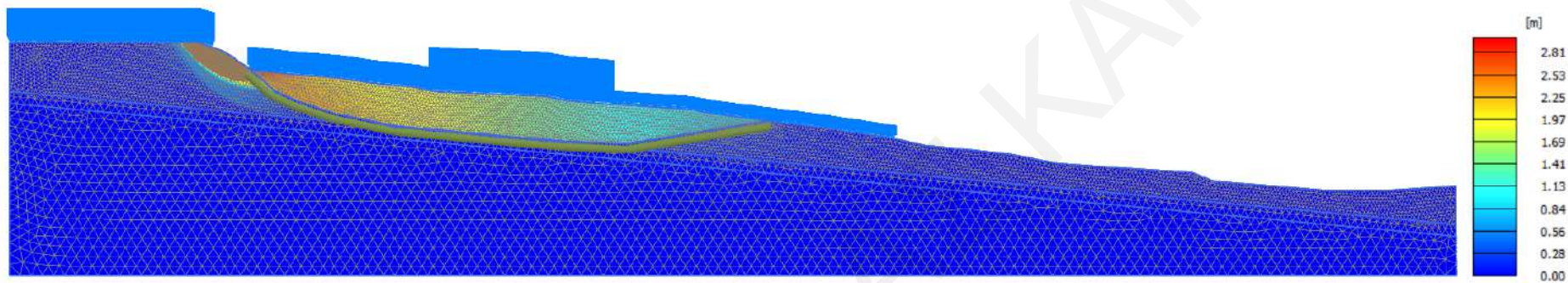
Σχήμα Π.42. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 42.



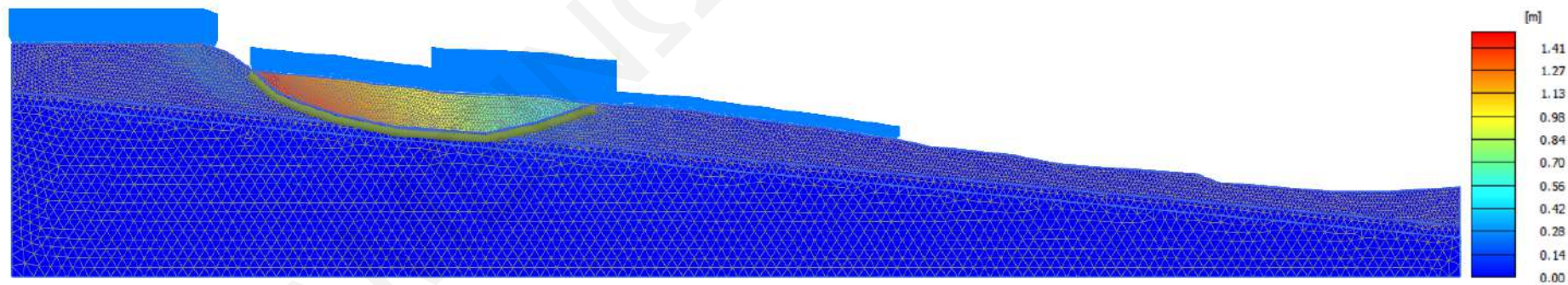
Σχήμα Π.43. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 43.



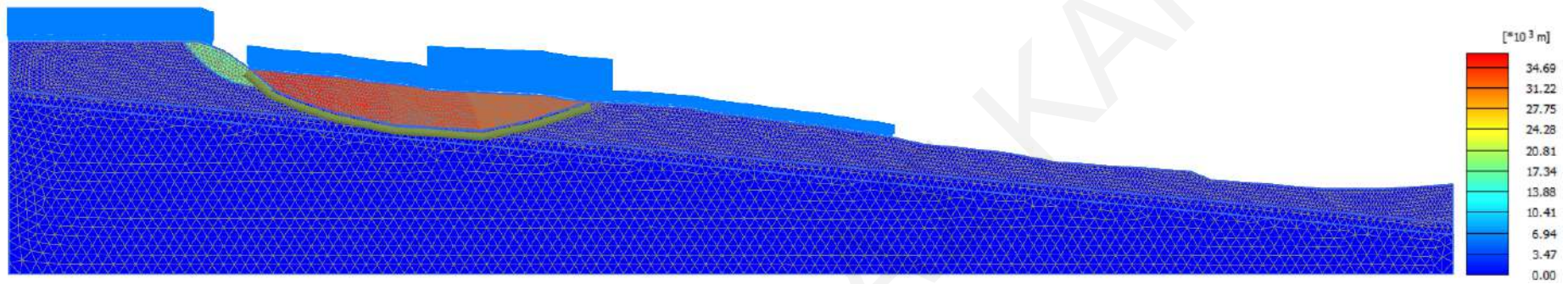
Σχήμα Π.44. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 44.



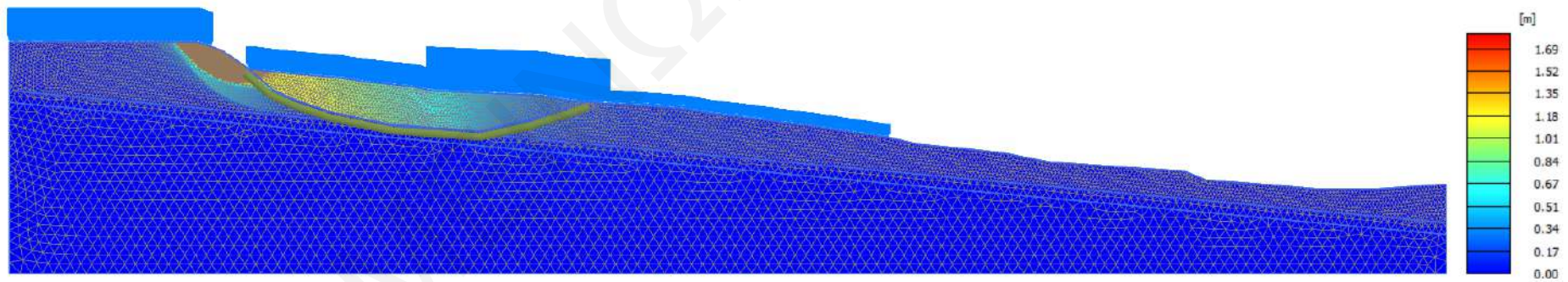
Σχήμα Π.45. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 45.



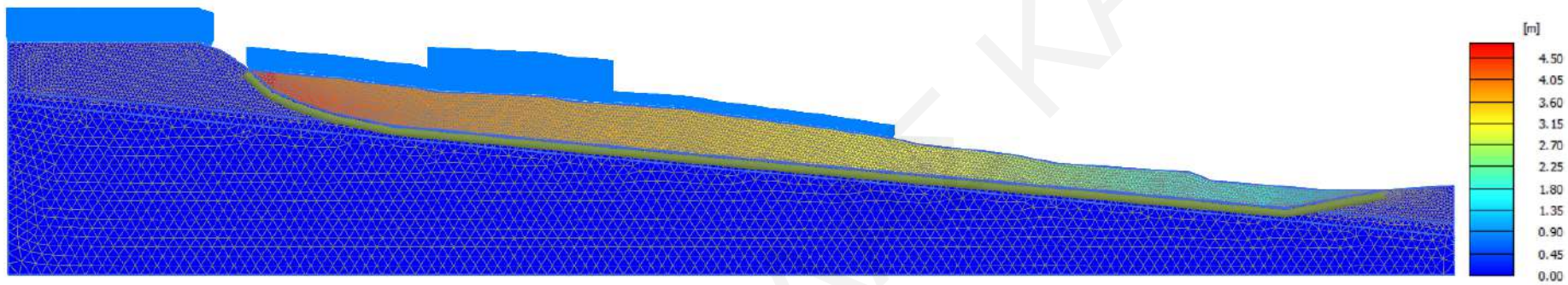
Σχήμα Π.46. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 46.



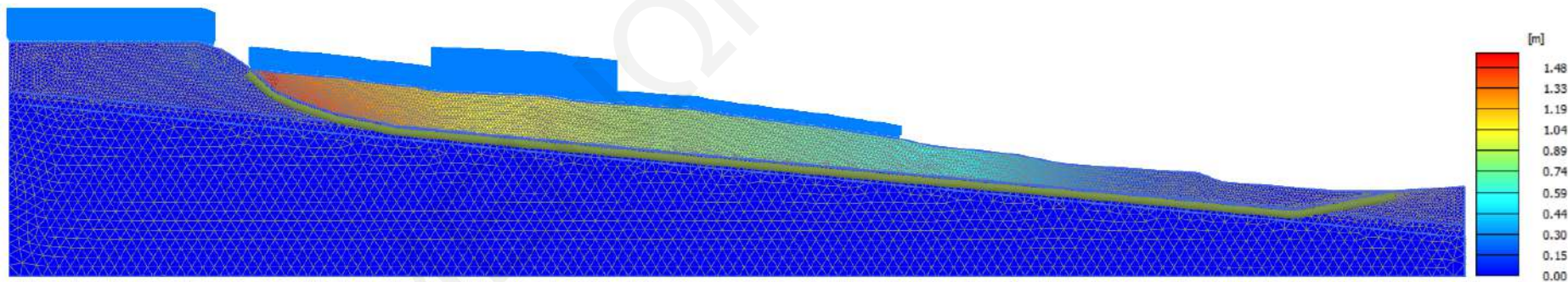
Σχήμα Π.47. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 47.



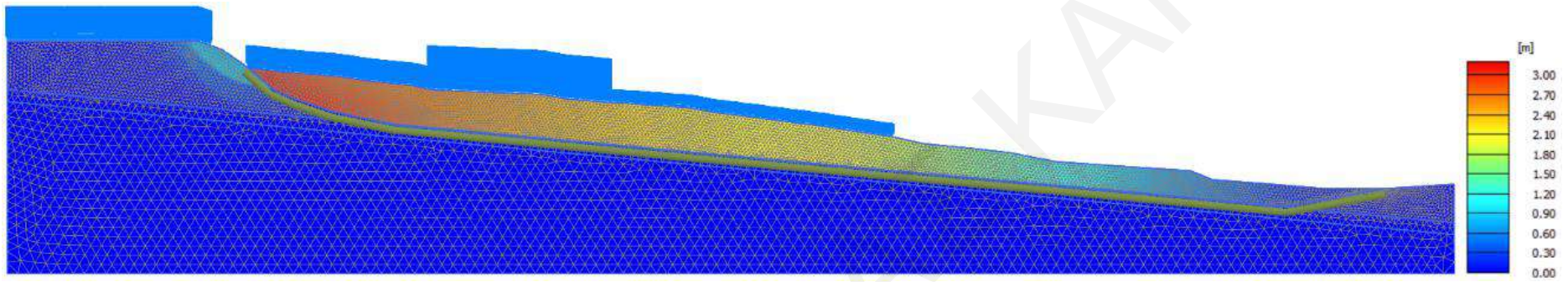
Σχήμα Π.48. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 48.



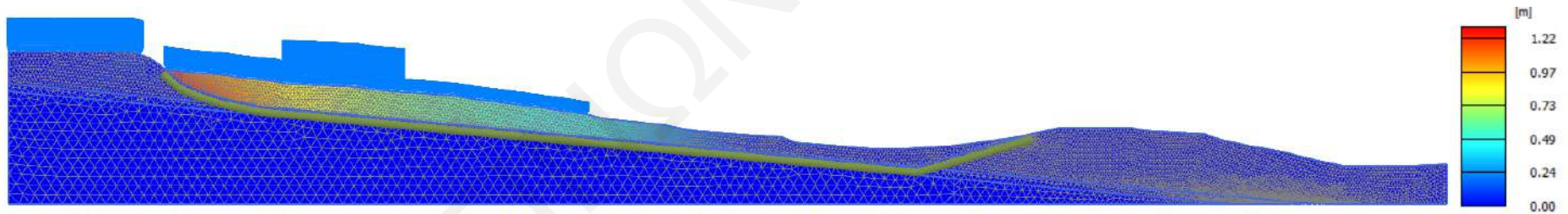
Σχήμα Π.49. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 49.



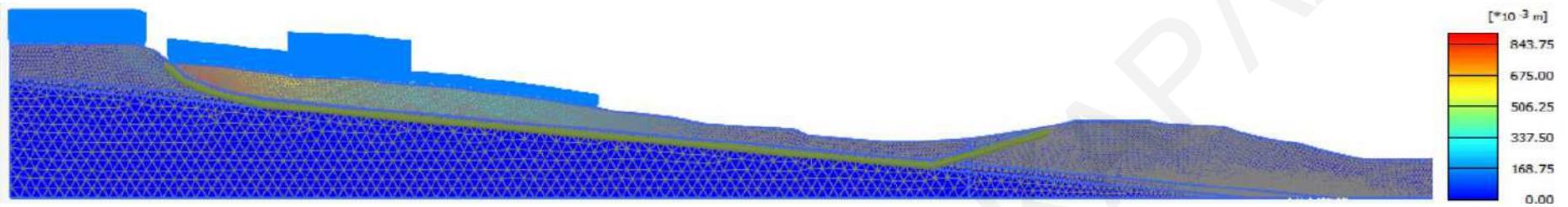
Σχήμα Π.50. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 50.



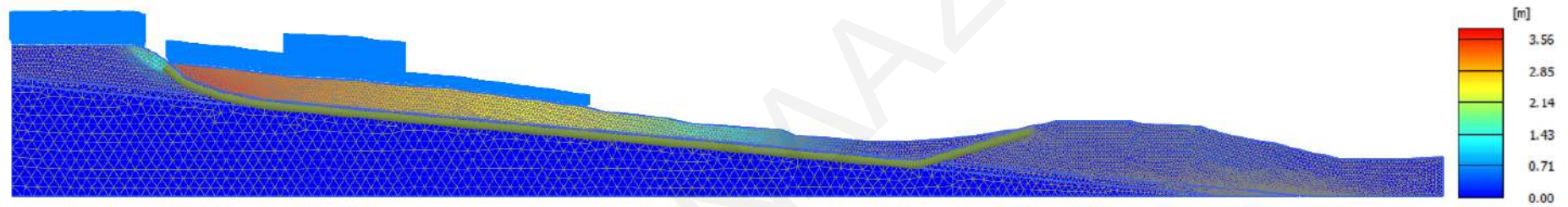
Σχήμα Π.51. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 51.



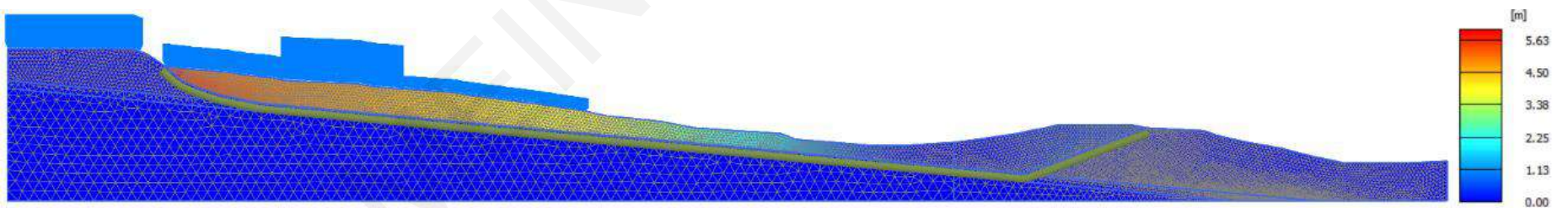
Σχήμα Π.52. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 52.



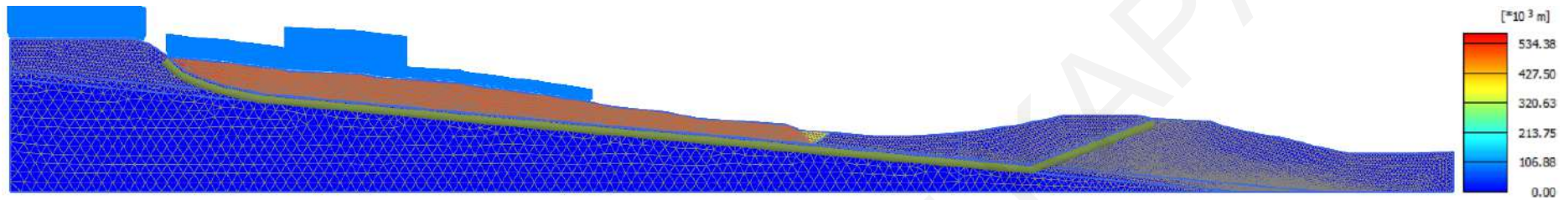
Σχήμα Π.53. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 53.



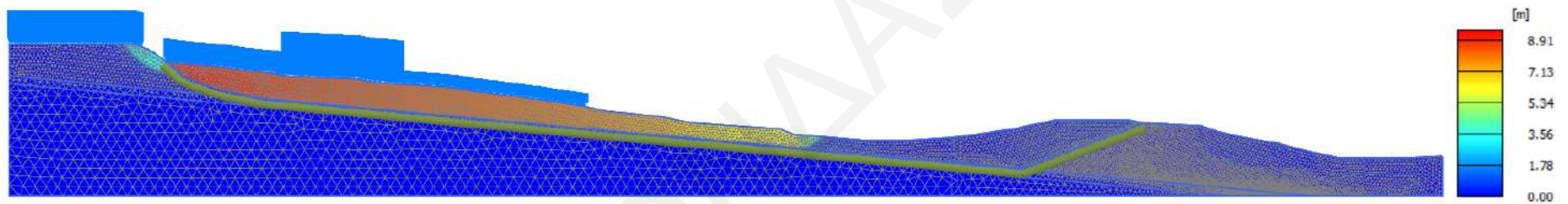
Σχήμα Π.54. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 54.



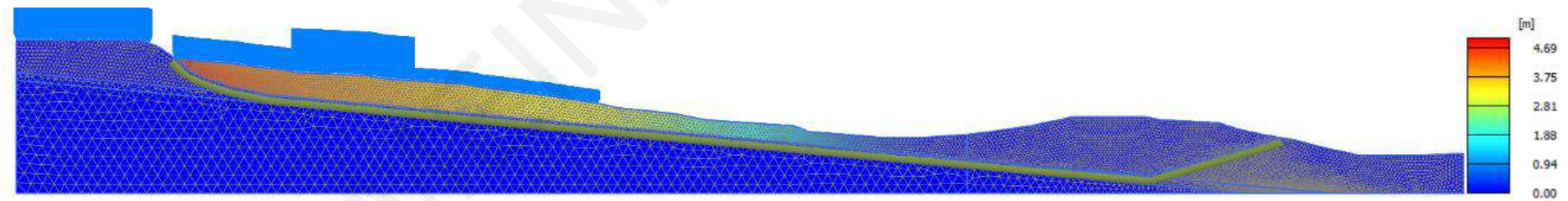
Σχήμα Π.55. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 55.



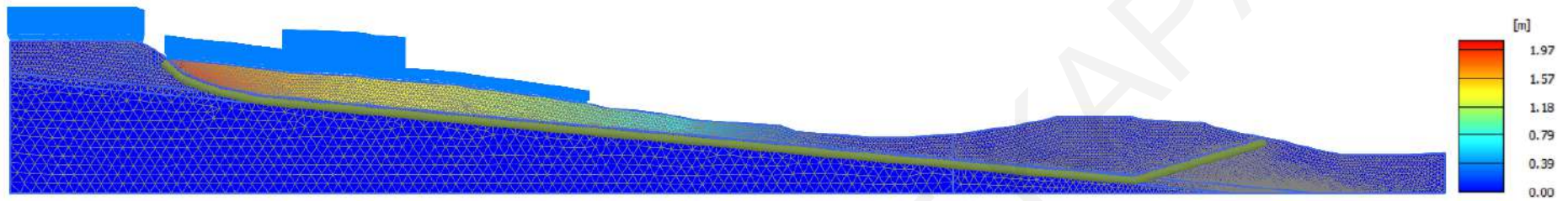
Σχήμα Π.56. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 56.



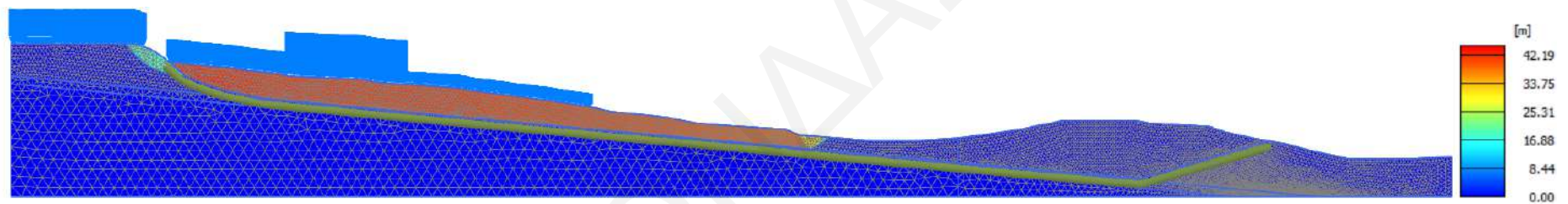
Σχήμα Π.57. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 57.



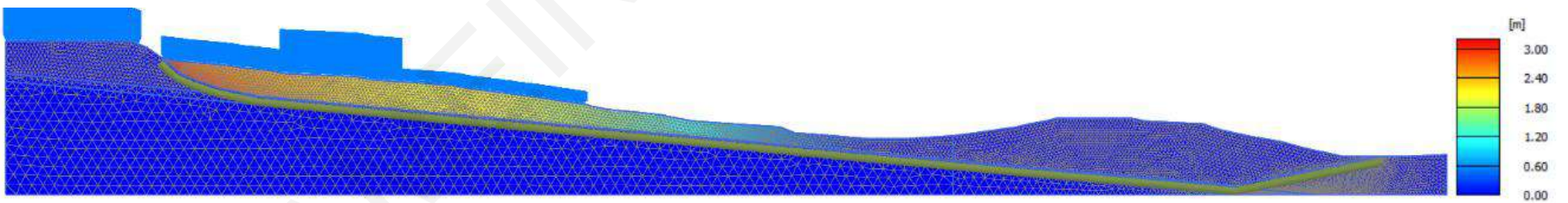
Σχήμα Π.58. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 58.



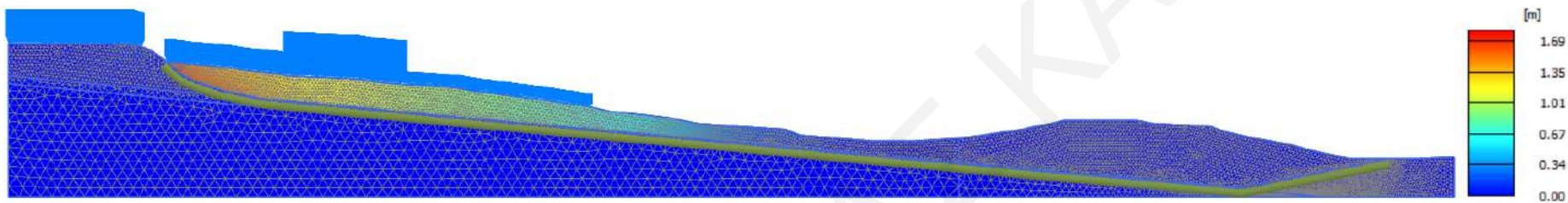
Σχήμα Π.59. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 59.



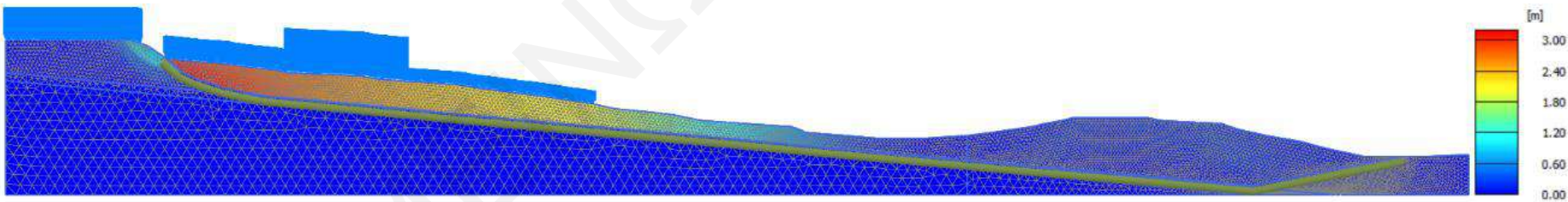
Σχήμα Π.60. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 60.



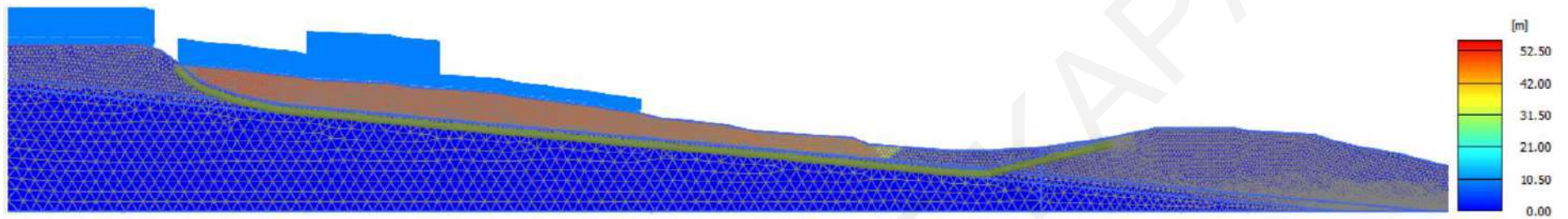
Σχήμα Π.61. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 61.



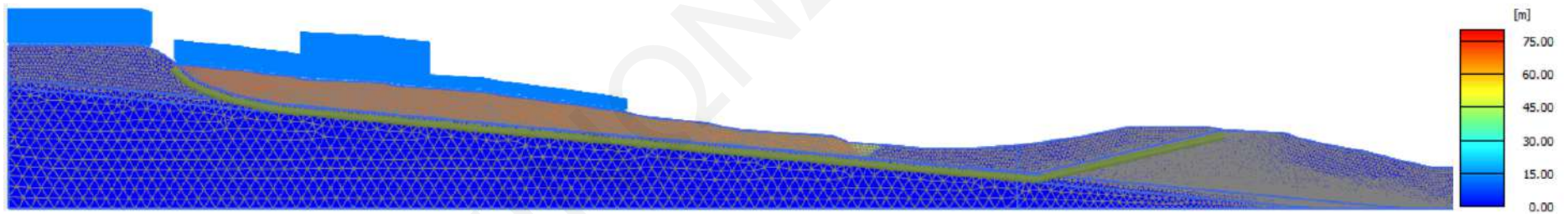
Σχήμα Π.62. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 62.



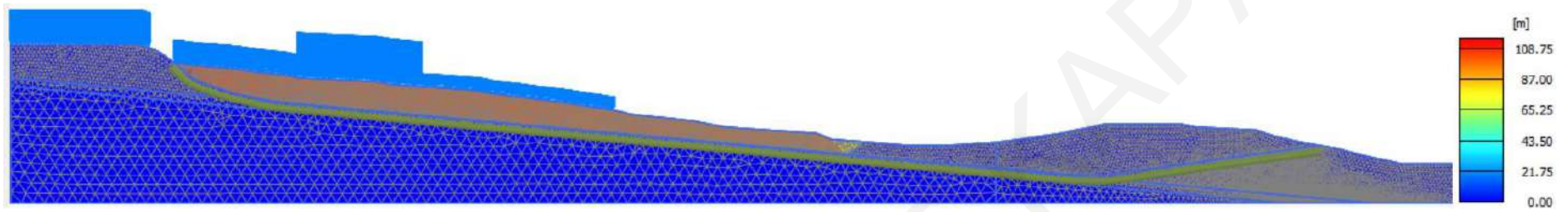
Σχήμα Π.63. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 63.



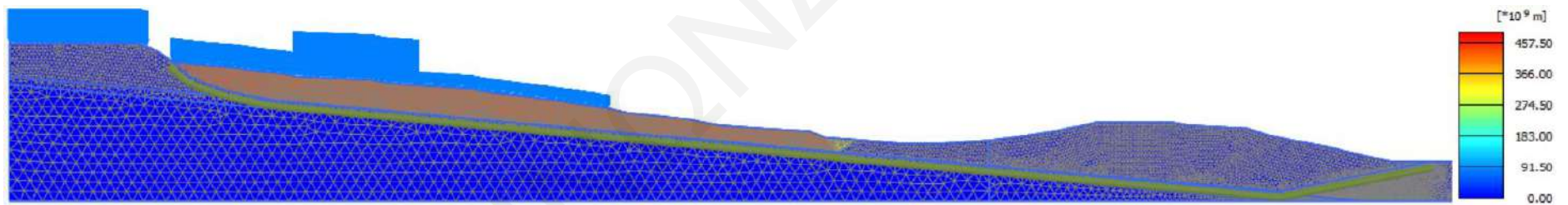
Σχήμα Π.64. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 64.



Σχήμα Π.65. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 65.



Σχήμα Π.66. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 66.



Σχήμα Π.67. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο τέλος της Ανάλυσης 67.